



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA**

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA ELETTRICA

TESI DI LAUREA MAGISTRALE

**PROGETTO E REALIZZAZIONE DI UN GENERATORE
A MAGNETE PERMANENTE PER MICROTURBINA**

**DESIGN AND MANUFACTURING OF A PM
GENERATOR FOR A MICROTURBINE**

RELATORE: PROF. NICOLA BIANCHI

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE

LAUREANDO: FETTI SERGIO

ANNO ACCADEMICO 2012-2013

Indice

SOMMARIO	4
INTRODUZIONE	5
1 PRESENTAZIONE DELLA MICROTURBINA	6
1.1 Che cos' é la microturbina	6
1.2 Principio di funzionamento	6
1.3 Dimensioni e potenza generata	7
1.4 Storia della microturbina	8
1.5 Microturbina e ambiente	9
1.6 Applicazioni attuali e future	10
2 PROGETTO E ANALISI DEL MODELLO	12
2.1 Progetto del primo modello	12
2.1.1 Progetto della geometria	12
2.1.2 Trattazione analitica teorica	13
2.1.3 Simulazione mediante software FEMM	20
2.1.4 Simulazione del modello a vuoto	29
2.1.5 Simulazione del modello a carico	50
2.1.6 Considerazioni sul modello progettato	60
2.2 Progetto del secondo modello	63
2.2.1 Progetto della geometria	63
2.2.2 Simulazione del modello a vuoto	64
2.2.3 Simulazione del modello a carico	80
2.2.4 Considerazioni sul modello progettato	90
2.3 Progetto del modello definitivo	94
2.3.1 Progetto della geometria	94
2.3.2 Simulazione del modello a vuoto	95
2.3.3 Simulazione a carico in regime sinusoidale	111
2.3.4 Simulazione a carico in regime continuo	120
2.3.5 Considerazioni sul modello progettato	127
3 COSTRUZIONE DEL GENERATORE	130
3.1 Costruzione del circuito magnetico	131
3.2 Costruzione degli avvolgimenti	132
3.3 Montaggio della carcassa metallica	134
4 COSTRUZIONE DEL RADDRIZZATORE	135
4.1 Progetto del modello di raddrizzatore	135
4.2 Analisi del convertitore con Power-Sim	143
4.3 Costruzione del convertitore	149

5	MISURE ESEGUITE SUL PROTOTIPO	150
5.1	Misura di tensione a vuoto	150
5.2	Misura di tensione con carico resistivo	154
5.3	Misura di tensione con convertitore AC/DC	157
5.4	Misura di coppia a vuoto	159
5.5	Misura di coppia in regime sinusoidale	166
5.6	Misura di coppia in regime continuo	172
6	STIMA DEI PARAMETRI ELETTROMECCANICI	179
6.1	Forza elettromotrice generata a vuoto	179
6.2	Corrente nominale	180
6.3	Resistenza degli avvolgimenti	180
6.4	Induttanza degli avvolgimenti	182
6.5	Perdite nel rame	184
6.6	Perdite nel ferro	185
6.7	Bilancio delle potenze	192
6.8	Rendimento del generatore	196
7	GENERATORE A MAGNETE PERMANENTE BIPOLARE	197
7.1	Simulazione del modello a vuoto	198
7.2	Simulazione a carico in regime sinusoidale	211
7.3	Simulazione a carico in regime continuo	218
7.4	Considerazioni sul modello progettato	222
7.5	Costruzione del generatore bipolare	224
7.6	Misure di tensione	226
7.7	Misure di coppia	231
7.8	Valutazione dei risultati ottenuti	244
	CONCLUSIONI	245
	RINGRAZIAMENTI	246
	Bibliografia	247

SOMMARIO

Il lavoro di tesi svolto verte sulla progettazione e successiva realizzazione di un generatore a magneti permanente per microturbina, ed è stato organizzato nel seguente modo:

- **Raccolta di informazioni**

In primo luogo è stata effettuata una ricerca sull'argomento da sviluppare, in modo tale da raccogliere il maggior numero di informazioni possibili inerenti l'argomento trattato; informazioni, notizie e dati tecnici sono stati reperiti attraverso testi disponibili nella biblioteca universitaria.

- **Progetto del generatore**

Il passo successivo è stato quello di progettare la configurazione geometrica del generatore a magneti permanente che si intende costruire, per raggiungere questo scopo è stato utilizzato un programma di simulazione denominato FEMM, in grado di analizzare il comportamento elettromagnetico di qualsiasi modello di macchina elettrica definita.

Tale software presenta un'interfaccia simile a quella di AUTOCAD, consentendo all'utente una rapida e semplice realizzazione della forma e della geometria del modello di macchina da analizzare, ed implementa il metodo di risoluzione denominato "agli elementi finiti".

- **Costruzione del generatore**

Una volta stabilita la forma, le dimensioni e la configurazione geometrica del generatore si è proceduto alla costruzione dello stesso; a tal fine sono stati ordinati tutti i materiali ed i relativi componenti necessari alla sua realizzazione.

La costruzione del generatore a magneti permanente è stata eseguita in laboratorio di Azionamenti Elettrici di ingegneria elettrica, nel quale sono stati reperiti tutti i materiali, attrezzi e strumenti necessari alla sua realizzazione.

- **Progetto e realizzazione del convertitore AC/DC**

Al fine di convertire la forza elettromotrice generata dal generatore a magneti permanente da alternata a continua è stato progettato e successivamente costruito un raddrizzatore monofase a presa centrale; per quanto riguarda la sua progettazione è stato impiegato il programma di simulazione denominato Power-Simulation, un software che sia come aspetto sia come principio di funzionamento è molto simile a P-Spice.

- **Misure e collaudo**

Dopo aver costruito il generatore ed il raddrizzatore ad esso associato sono state eseguite una serie di misure di tensione e di coppia sullo stesso, al fine di verificare che le prestazioni ed il comportamento elettromagnetico siano conformi ai risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate mediante software FEMM.

Le misure di tensione sono state eseguite mediante oscilloscopio digitale, mentre le misure di coppia sono state fatte mediante torsionometro meccanico, entrambi gli strumenti sono stati reperiti in laboratorio di Azionamenti Elettrici.

- **Stima dei parametri**

Terminate le misure di tensione e coppia sul generatore si è proceduto alla stima sia analitica sia empirica dei parametri caratteristici del generatore costruito, quali resistenza e reattanza degli avvolgimenti, perdite, rendimento ecc.. in modo da definire i cosiddetti dati di targa della macchina realizzata.

INTRODUZIONE

La tesi redatta descrive in modo preciso e dettagliato tutto il lavoro eseguito per progettare e realizzare il generatore a magnete permanente con il quale si prevede di realizzare una microturbina; essa è stata suddivisa in sette capitoli, il cui contenuto viene brevemente presentato qui di seguito:

- **CAPITOLO 1**

Il primo capitolo presenta una descrizione del tutto generale della microturbina, ovvero il convertitore elettromeccanico il cui componente principale è il generatore a magnete permanente realizzato.

In particolare vengono descritti il principio di funzionamento, le caratteristiche costruttive, pregi e limiti, applicazioni attuali e future.

- **CAPITOLO 2**

Il secondo capitolo descrive il lavoro svolto per progettare la geometria e le dimensioni del generatore a magnete permanente da costruire, e riporta tutte le simulazioni eseguite mediante software FEMM sui diversi modelli geometrici proposti, con tanto di grafici, tabelle, dimostrazioni e commenti sui risultati ottenuti.

- **CAPITOLO 3**

Il terzo capitolo descrive dettagliatamente tutta la fase di costruzione del generatore progettato, i materiali impiegati e le loro caratteristiche.

- **CAPITOLO 4**

Nel quarto capitolo viene descritto il lavoro svolto per progettare e realizzare il convertitore AC/DC impiegato per convertire da alternata a continua la forza elettromotrice generata dal generatore a magnete permanente costruito.

- **CAPITOLO 5**

In questo capitolo vengono descritte tutte le misurazioni di tensione e di coppia eseguite sul generatore a magnete permanente per differenti condizioni di carico.

- **CAPITOLO 6**

Il capitolo sesto descrive le modalità analitiche ed empiriche con le quali sono stati stimati i parametri elettrici caratteristici del generatore costruito, ovvero tensione nominale a vuoto, corrente nominale a carico, resistenza e reattanza degli avvolgimenti, perdite nel rame, perdite nel ferro e rendimento.

In sostanza vengono forniti i cosiddetti dati di targa della macchina costruita, proprio come se dovesse essere immessa nel mercato.

- **CAPITOLO 7**

Il settimo capitolo descrive le caratteristiche elettromagnetiche ottenute sia mediante software di simulazione FEMM sia mediante misure di tensione e di coppia di un modello di generatore a magnete permanente a due poli, ottenuto apportando una variazione geometrica al modello precedente.

In particolare viene eseguito un confronto sulle caratteristiche e sulle prestazioni presentate dai due modelli di generatore nelle differenti condizioni di carico considerate.

Capitolo 1

PRESENTAZIONE DELLA MICROTURBINA

1.1 CHE COS' È LA MICROTURBINA

La microturbina si può definire come un generatore portatile di energia elettrica. Sia per caratteristiche costruttive sia per principio fisico può essere considerata a tutti gli effetti una **turbo-macchina in miniatura**. Essa è costituita da una parte rotante e da una parte fissa (statore); la parte rotante è composta da un unico componente sul quale sono rigidamente connessi tre organi meccanici:

- Una mini turbina, la cui palettatura rispecchia fedelmente la stessa configurazione geometrica delle “macro” turbine dei generatori sincroni di grossa taglia.
- Un albero meccanico in miniatura che permette la connessione rigida tra mini turbina e rotore.
- Il rotore vero e proprio, che permette l'interazione elettromagnetica con lo statore.

Essendo rotore e mini turbina rigidamente connesse sullo stesso asse (ovvero senza giunti di accoppiamento) parte elettrica e parte meccanica risultano pertanto “integrate” all'interno di un unico componente, questa innovazione ha permesso di risolvere non pochi problemi realizzativi che inevitabilmente si incontrano nel passaggio da una turbina industriale di pochi metri ad una mini turbina di alcuni millimetri. Statore e rotore possono assumere svariate configurazioni geometriche, a seconda delle caratteristiche desiderate dal generatore e da come viene creato il flusso principale; sarà infatti parte preponderante di questa tesi la progettazione accurata della geometria della macchina al fine di ottenere le migliori prestazioni possibili.

1.2 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Il principio di funzionamento risulta del tutto analogo a quello dei grandi generatori sincroni, progettati e realizzati per produrre energia a potenze molto elevate. L'idea di base è quella di sfruttare l'energia cinetica e di pressione possedute da un fluido direttamente disponibile nell'ambiente o in prossimità di un impianto industriale (ad esempio un gasdotto) per far ruotare la mini turbina connessa al rotore del generatore; in questo modo viene fornita potenza meccanica che sarà successivamente convertita in potenza elettrica dal generatore e direttamente disponibile in loco. È evidente che la forza elettromotrice così prodotta presenta una forma d'onda sinusoidale, ovvero sarà una tensione elettrica alternata. Considerando tuttavia che la maggior parte dei dispositivi elettrici ed elettronici che richiedono piccole potenze necessitano una fornitura di tensione in continua, spesso e volentieri viene associato a questo tipo di generatore un raddrizzatore statico. Per questo motivo, oltre al progetto di una microturbina, ho ritenuto importante dedicare un certo spazio nel lavoro di tesi alla progettazione di un raddrizzatore (in verità molto

semplice) direttamente associabile al micro generatore, in modo tale da rendere disponibile forza elettromotrice in continua. Si tratta dunque di “miniaturizzare” un generatore sincrono di grossa potenza comunemente impiegato nelle grandi centrali di produzioni riportando il tutto ad un dispositivo che si può tranquillamente portare nel palmo di una mano.

1.3 DIMENSIONI E POTENZA GENERATA

Il micro generatore che si è deciso di progettare presenterà dimensioni davvero molto ridotte, addirittura “tascabili” ! Per quanto riguarda lo statore si prevedono approssimativamente una lunghezza di 5 o 6 [cm] per una altezza di 5,5 o 7 [cm]. Turbina e rotore presenteranno invece un diametro approssimativamente fissato sui 14 o 15 [mm], ovvero dimensioni paragonabili a quelle di una moneta da un euro ! Occorre precisare che le dimensioni suggerite sono state fissate in sede di progetto in base alla potenza che si prevede di ottenere dalla macchina; le dimensioni effettive verranno riportate nella seconda parte della tesi una volta realizzato il prototipo. Si è ritenuto opportuno riportare qui di seguito alcune foto di uno dei primi modelli di microturbina realizzati in Italia, dal quale ho preso spunto per la realizzazione del micro generatore.



Fig. 1.1: Esempio di microturbina



Fig. 1.2: Esempio di microturbina tascabile

Nonostante le dimensioni siano notevolmente ridotte la potenza elettrica ottenibile da questo tipo di micro generatori è tutt' altro che irrilevante; nei casi migliori si possono ottenere fino a 30 [W]. La forza elettromotrice ottenibile da una microturbina avente le suddette dimensioni può arrivare sino a 10 [V] di valore efficace, paragonabile al valore massimo di tensione ottenibile da una batteria. Al fine di fornire una descrizione tecnica breve ma al tempo stesso dettagliata riguardante le prestazioni di questa tipologia di generatori si è ritenuto opportuno riportare un elenco completo contenente le caratteristiche elettriche e meccaniche di maggiore interesse:

Tabella 1.1: Scheda tecnica di una microturbina

GRANDEZZA	SIMBOLO	VALORE NUMERICO	UNITA' DI MISURA
Potenza generata	P _g	10 ÷ 30	[W]
Tensione nominale	V _n	10 ÷ 12	[V]
Velocità di rotazione	n	3'000 ÷ 100'000	[rpm]
Pressione fluido	p	1 ÷ 2	[bar]
Vita utile		10	[anni]

1.4 STORIA DELLA MICROTURBINA

L'invenzione della microturbina è piuttosto recente e risale a circa un anno fa, precisamente lo scorso Novembre 2012. L'idea è nata da **Emanuele Guglielmino**, un noto ingegnere ligure di 39 anni durante la sua permanenza alla General Electric (Italia) e Westinghouse (Inghilterra), proprio mentre si stava occupando di turbine industriali di grandi dimensioni. Egli infatti si rese conto che le grandi reti di distribuzione di acqua e gas necessitano di un puntuale controllo delle tubature, in aggiunta alla necessità di gestire i costi.

Per fare un esempio si pensi a chi possiede un **gasdotto** oppure un **acquedotto** di migliaia di chilometri, il quale deve affrontare la necessità di installare localmente (magari anche in luoghi remoti) telecamere per monitorare eventuali malfunzionamenti oppure dispositivi elettrici per garantire un costante controllo dei valori della pressione del fluido all'interno delle tubature.

Per alimentare questi dispositivi sarebbe necessario stendere chilometri di cavi elettrici per il trasporto della corrente, con costi piuttosto rilevanti. Sulla base di queste considerazioni Guglielmino pensò dunque che la soluzione più congeniale fosse quella di realizzare dei piccoli generatori portatili, installabili in loco, che potessero evitare l'impiego di chilometri di costosi e ingombranti cavi. Ecco dunque l'idea di realizzare delle microturbine, le cui dimensioni sono paragonabili a quelle di una moneta, facili da trasportare e installare nei punti desiderati dell'impianto per produrre l'energia elettrica necessaria all'alimentazione dei dispositivi elettrici di controllo.

Lo studio, la progettazione e la realizzazione del primo modello di microturbina è stato portato a termine dall'**Istituto Italiano di Tecnologia** (sede a Genova) proprio sotto la guida del ricercatore e team leader Guglielmino, con la collaborazione del collega ingegnere **Michele Focchi**. Il progetto e la costruzione di questo innovativo generatore ha richiesto circa un anno di lavoro, tempo non lungo se si tiene conto che il passaggio dal "macro" al "micro" determina inevitabilmente l'insorgenza di inconvenienti e problematiche che non si incontrano nella realizzazione di turbine di grandi dimensioni (pur essendo del tutto analogo il principio fisico sfruttato).

Anche se apparentemente semplice, la microturbina è un concentrato di innovazione ed efficienza

energetica, e ha già attirato l'attenzione di aziende e associazioni scientifiche nazionali e internazionali, le quali hanno persino dato la loro disponibilità al versamento di fondi atti a migliorare e sviluppare il progetto iniziale.



Fig. 1.3: Emanuele Guglielmino:
padre della microturbina

Una volta raggiunto l'obiettivo non sono mancati i riconoscimenti per Guglielmino ed il suo team, tanto da riuscire ad inanellare 4 premi in pochi mesi ! I primi ad apprezzare il valore della microturbina sono stati i membri responsabili della fondazione italo-americana **Mind Bridge**, la quale si occupa di contattare imprenditori e ricercatori italiani mettendo loro a disposizione fondi californiani.

Ben presto il progetto innovativo cattura l'attenzione anche in Italia, e nel 2012 viene selezionato tra le migliori idee d'innovazione da **Italia Camp** e dal **Premio nazionale dell'Innovazione**. Particolari riconoscimenti sono giunti anche dalla **Start Cup 'Ricerca-Il Sole 24 ORE**.

Tutto questo ha permesso a Guglielmino ed il suo team di mettere insieme un budget iniziale di circa 25 mila euro, che saranno immediatamente investiti per dare vita ad una azienda specializzata nella commercializzazione di microturbine su scala industriale. Tutto ciò fa presagire che questa famiglia innovativa di generatori sarà in futuro oggetto di studio, ricerca e di sviluppo, e che nuovi orizzonti potrebbero aprirsi sulla commercializzazione su vasta scala dei microgeneratori !

1.5 MICROTURBINA E AMBIENTE

La microturbina rientra nella categoria dei cosiddetti sistemi “**Energy Harvesting**”, ovvero sistemi che sfruttano piccole quantità di energia meccanica localmente disponibile nell'ambiente o negli impianti industriali per alimentare sensori o strumenti di misura. L'energia prodotta in loco è assolutamente energia pulita e la lunga durata di vita della microturbina (**circa 10 anni**) rendono questo micro generatore una macchina ad altissima efficienza energetica; tutto questo rigorosamente in linea con la politica “Green Energy” verso la quale l'Europa si sta indirizzando. L'elevata efficienza energetica è inoltre dovuta al fatto che l'energia prodotta dalla microturbina, oltre che essere pulita, risulta anche estremamente economica, garantendo un minor costo marginale sulla produzione.

1.6 APPLICAZIONI ATTUALI E FUTURE

Come è già stato descritto in precedenza questa famiglia di generatori trovano la loro principale applicazione come alimentatori di sensori, di dispositivi di controllo e strumenti elettrici di misura negli impianti industriali di distribuzione che si sviluppano su elevate lunghezze (centinaia o migliaia di chilometri).

In particolare i pregi della microturbina sono evidenti negli impianti industriali quali **gasdotti** e **acquedotti** che richiedono l'installazione di sensori, dispositivi di monitoraggio (ad esempio telecamere) e dispositivi di misura in luoghi remoti lontani da fonti di energia elettrica. Questi dispositivi vengono attualmente alimentati accedendo ad una rete elettrica mediante lunghi cavi in rame, oppure tramite una batteria collegata agli strumenti sempre via cavo. Alimentare i sensori di misura e controllo in questo modo presenta notevoli inconvenienti: i cavi in rame (specie se di elevata lunghezza) sono sede di perdite joule e col tempo si possono danneggiare, i connettori dei cavi sono soggetti ad usura e incrostazioni, le batterie sono caratterizzate da una vita utile relativamente breve e sono soggette ad esaurimento, la sostituzione di batterie installate in luoghi remoti comporta fatica e perdita di tempo ecc..

Il verificarsi di questi inconvenienti possono causare una rischiosa interruzione dei dispositivi elettrici di controllo e misura, con un conseguente fermo dell'impianto. La microturbina invece non presenta nessuno di questi inconvenienti e si presta perciò meglio di qualunque altro generatore ad alimentare questi dispositivi; per farla breve è stata pensata proprio per sostituirsi alle batterie e ai cavi, garantendo quindi una alimentazione costante ai sensori e assicurando la sicurezza alle persone e all'impianto. Oltre che nei gasdotti e acquedotti, questo micro generatore trova impiego (sempre in sostituzione ad una batteria) anche nel settore **nautico** e **ferroviario**. Si ritiene opportuno riportare qui di seguito sottoforma di elenco tutti i vantaggi che la microturbina offre rispetto ad una comune batteria, proprio perchè è stata ideata (in un futuro prossimo) per sostituirla:

- Rispetto ad una batteria di pari volume produce più energia.
- Vita utile più elevata (circa 10 anni).
- Sono sufficienti 2 bar di pressione del fluido per alimentarla.
- Può sostituire un UPS con batteria, garantendo grande affidabilità in caso di black-out.
- E' in grado di produrre fino a 30 [W] di potenza elettrica.

Riportiamo qui di seguito le attuali principali applicazioni della microturbina, specificando inoltre le aziende che ne hanno richiesto la fornitura:

- Alimentatore per contatori intelligenti del gas previsti per utenti privati con piccolo serbatoio (la microturbina sfruttando il flusso del gas alimenterebbe i sensori ed il link wireless). *Ente Interessato:* TELEMETRIA LIQUIGAS.
- Alimentatore per dispositivi di controllo e monitoraggio negli impianti di distribuzione di gas. *Ente Interessato:* ENI.
- Alimentatore impiegato in centrali e zone classificate ATEX (atmosfera esplosiva). *Ente Interessato:* ASNALDO ENERGIA.
- Alimentatore di sensori di monitoraggio per convogli ferroviari (in particolare nei vagoni merci dove è presente l'aria della condotta frenante ma non elettricità) *Ente Interessato:* ALSTOM FERROVIARIA
- Generatore impiegato in applicazioni automotive nelle quali risulta problematica la riduzione dei cablaggi in rame. *Ente Interessato:* TESLA MOTORS.
- Generatore impiegato in applicazioni nautiche che sfruttano il moto relativo dell'acqua sotto carena. *Ente Interessato:* IMPRESE EDILI NAVALI.

Per quanto riguarda ulteriori sviluppi futuri, il progetto sembra interessare diversi investitori internazionali e numerose aziende già avviate, tra le quali la famosa **Silicon Valley** che ha già reso noti i suoi apprezzamenti in qualche occasione. Attualmente sono in corso valutazioni di nuove applicazioni e la definizione del “Business Model” più adatto per questa tecnologia, al fine di favorirne una diffusione su larga scala. Un successivo perfezionamento della microturbina (da poco messo a punto) consiste nell’aggiunta di una scheda wireless, in modo tale che la lettura dei sensori può essere convogliata a qualunque rete radio, permettendo la trasmissione dell’informazione direttamente all’operatore (magare inviando automaticamente un sms al suo cellulare). Tutto questo lascia presagire che la microturbina potrà diventare a tutti gli effetti la **batteria del futuro**; lo stesso Guglielmino ha da poco dichiarato di essere già al lavoro per dare vita ad una azienda specializzata nella commercializzazione di microturbine su scala industriale. Oltretutto sono molti gli investitori che di loro iniziativa hanno contattato Guglielmino per avere informazioni riguardanti il progetto, e si sono offerti di mettere a disposizione fondi per contribuire economicamente alla nascita di un’azienda specializzata in questo settore. Tutto ciò è la dimostrazione del fatto che anche in un 2013 all’insegna della crisi economica e dell’incertezza, di fronte a idee veramente valide ed innovative ci sono ancora diversi investitori disposti a rendere disponibili le loro risorse. Auguriamoci dunque che questo esempio possa servire da stimolo per tanti giovani ricercatori !

Capitolo 2

PROGETTO E ANALISI DEL MODELLO

2.1 PROGETTO DEL PRIMO MODELLO

2.1.1 Progetto della geometria

Il passo successivo alla descrizione della storia della microturbina e delle sue applicazioni è stato quello di progettare la geometria, soffermandoci in particolare sulla parte elettrica composta da statore e rotore. Partendo da una configurazione standard di macchina elettrica a magneti permanenti è stato abbozzato un primo modello di generatore caratterizzato da una geometria molto semplice; l'idea è stata infatti quella di partire da una configurazione geometrica di macchina il più elementare possibile (in modo da prevederne facilmente il comportamento elettromagnetico) per poi passare successivamente a modelli sempre più complessi e perfezionati.

Il primo modello di microgeneratore adottato viene qui di seguito riportato, nel quale si possono notare le dimensioni dei vari componenti espresse in millimetri:

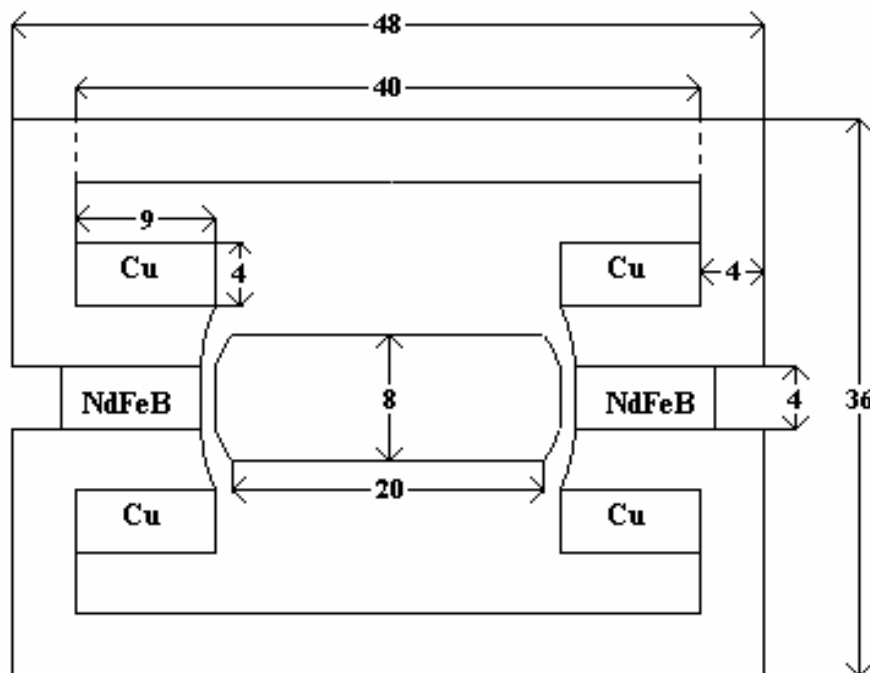


Fig. 2.1: Primo modello di microturbina - SCALA 2:1

Per quanto riguarda la scelta della forma del modello si è fatto riferimento alla geometria classica delle macchine a magneti permanenti, prendendo in considerazione anche prototipi di microturbine già presenti nel mercato. La forma rettangolare dello statore che richiama l'idea del nucleo a colonne del trasformatore monofase presenta sia il vantaggio di avere un assetto semplice, agevole e stabile, sia il vantaggio della semplicità costruttiva. In linea di principio è possibile realizzare lo statore con lamierini a giunti piallati o intersecati esattamente come si realizza il nucleo ferromagnetico di un trasformatore monofase a colonne. Le dimensioni del modello sono state stabilite (anche se in modo piuttosto approssimativo) prefissando il valore di potenza attiva ottenibile dal microgeneratore, valore di circa 5 [W]. La sagomatura del rotore e delle espansioni polari di statore è stata progettata al fine di raggiungere i seguenti obiettivi:

- Ottenere il valore di forza elettromotrice indotta il più alto possibile.
- Ottenere una forma d'onda della tensione il più possibile sinusoidale.
- Ottenere un valore di oscillazione di coppia il minore possibile.
- Ridurre il più possibile la presenza di flussi dispersi.

L'indotto del microgeneratore (ossia la componente della macchina sede di forza elettromotrice indotta) è costituita da due semibobine di rame connesse in serie, mentre la sorgente di campo magnetico è costituita da due magneti permanenti realizzati in **NdFeB** (lega di Neodimio, Ferro e Boro) le cui proprietà magnetiche saranno descritte in dettaglio nel quarto capitolo. Una volta predisposta la configurazione geometrica della macchina si passa poi ad una analisi dettagliata del comportamento della stessa, sia attraverso una descrizione analitica rigorosa, sia mediante l'ausilio di programmi di simulazione; al fine di stabilire se il modello di microgeneratore adottato sarà veramente in grado di fornire le prestazioni desiderate.

2.1.2 Trattazione analitica teorica

Analisi a vuoto

Una volta stabilita la configurazione geometrica del modello si deve eseguire l'analisi analitica dello stesso, in modo tale da prevederne il comportamento e le prestazioni ottenibili. Innanzitutto si ritiene opportuno descrivere in dettaglio il principio di funzionamento di questo primo modello di microgeneratore.

Supponiamo dunque che un fluido in moto (acqua o gas) fornisca la necessaria potenza meccanica imprimendo una coppia costante T al rotore, il quale inizierà a ruotare con velocità ω_m costante. Si consideri una velocità di regime ipotetica di circa 3000 [rpm]. Potenza meccanica P_m fornita dal fluido e coppia risultante agente sul rotore dovranno certamente soddisfare la nota relazione:

$$P_m = \omega_m \cdot T \quad (2.1)$$

La coppia di magneti permanenti posti sullo statore danno origine ad un campo di induzione magnetica \vec{B} il cui flusso Φ ad esso associato attraversa il circuito ferromagnetico comprendendo parzialmente anche la superficie del rotore. In questo modo il flusso generato concatena ciascuna delle semibobine avvolte sulle espansioni polari del generatore, le quali vengono connesse in serie per ottenere il massimo valore di forza elettromotrice indotta. Il flusso concatenato con la bobina sarà pari al prodotto tra il flusso Φ ed il numero di spire nc della stessa:

$$\Phi_c(t) = nc \cdot \Phi(t) \quad (2.2)$$

Il dimensionamento della bobina (determinazione del numero di spire nc e della lunghezza ℓ dell'avvolgimento) verrà presentato nei successivi paragrafi quando si avranno a disposizione la forma d'onda della tensione indotta e e della corrente di bobina i .

Al variare della posizione angolare θ_m del rotore varia nel tempo il flusso concatenato Φ_c con la

bobina di statore, pertanto si induce in essa una forza elettromotrice indotta pari alla derivata temporale del flusso concatenato, secondo la nota relazione:

$$e(t) = -\frac{d\Phi_c(t)}{dt} \quad (2.3)$$

La forma d'onda della forza elettromotrice indotta e dipende sostanzialmente dalla forma d'onda del flusso concatenato Φ_c e dalla rapidità con cui esso varia nel tempo. Al fine di realizzare un generatore di buona qualità si desidera ottenere un elevato valore di forza elettromotrice indotta (fissato circa sui 24 [V]) ma soprattutto una forma d'onda il più possibile sinusoidale.

È tuttavia intuitivo prevedere che un flusso concatenato ottenuto con questo modello di generatore non presenterà una forma d'onda perfettamente sinusoidale, ma sarà caratterizzata da un certo contenuto armonico. Al fine di stimare il valore efficace e la forma d'onda della tensione e indotta è opportuno analizzare il contenuto armonico del flusso concatenato Φ_c mediante la scomposizione in serie di Fourier:

$$\Phi_c(t) = F_o + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)] \quad (2.4)$$

Nella quale il valore medio F_o e i vari coefficienti delle armoniche a_k e b_k sono rispettivamente pari a:

$$F_o = \frac{1}{T} \int_0^T \Phi_c(\omega t) dt \quad (2.5)$$

$$a_k = \frac{2}{T} \int_0^T \Phi_c(\omega t) \cos(k\omega t) dt \quad (2.6)$$

$$b_k = \frac{2}{T} \int_0^T \Phi_c(\omega t) \sin(k\omega t) dt \quad (2.7)$$

I parametri ω e T rappresentano rispettivamente la pulsazione ed il periodo della funzione flusso Φ_c . Particolarmente interessante risulta essere la prima armonica (detta anche armonica fondamentale) ovvero la forma d'onda che presenta la stessa frequenza della funzione di base. Essa sarà caratterizzata da una funzione temporale λ_1 del tipo:

$$\lambda_1(t) = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t) \quad (2.8)$$

Valore efficace e fase della k -esima armonica λ_k del flusso concatenato saranno rispettivamente pari a:

$$F_k = \sqrt{\frac{a_k^2 + b_k^2}{2}} \quad (2.9)$$

$$\phi_k = \arctan \left(-\frac{b_k}{a_k} \right) \quad (2.10)$$

Approssimando la forma d'onda del flusso Φ_c con quella della sua armonica fondamentale λ_1 è possibile stimare ampiezza e fase della forza elettromotrice indotta nella bobina di statore; infatti partendo dalla nota relazione:

$$e(t) = -\frac{d\Phi_c(t)}{dt}$$

Ponendo per approssimazione $\Phi_c = \lambda_1$ si ottiene un'espressione approssimata della forza elettromotrice indotta:

$$e(t) = -\frac{d\lambda_1(t)}{dt}$$

Introducendo l'espressione temporale λ_1 della prima armonica si ottiene pertanto:

$$e(t) = -\frac{d[a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t)]}{dt}$$

$$e(t) = -[-\omega \cdot a_1 \sin(\omega t) + \omega \cdot b_1 \cos(\omega t)]$$

Si ricava in questo modo l'espressione temporale della forza elettromotrice indotta nella bobina di statore:

$$e(t) = \omega \cdot a_1 \sin(\omega t) - \omega \cdot b_1 \cos(\omega t) \quad (2.11)$$

Essa sarà caratterizzata da valore efficace e fase rispettivamente pari a:

$$V_1 = \sqrt{\frac{(a_1 \cdot \omega)^2 + (b_1 \cdot \omega)^2}{2}} = \sqrt{\frac{\omega^2(a_1^2 + b_1^2)}{2}} = \omega \sqrt{\frac{a_1^2 + b_1^2}{2}} = \omega F_1 \quad (2.12)$$

$$\alpha_1 = \arctan\left(\frac{a_1 \cdot \omega}{b_1 \cdot \omega}\right) = \arctan\left(\frac{a_1}{b_1}\right) \quad (2.13)$$

Riprendendo in esame le espressioni temporali della prima armonica λ_1 del flusso concatenato e della tensione indotta e :

$$\lambda_1(t) = a_1 \cos(\omega t) + b_1 \sin(\omega t)$$

$$e(t) = \omega \cdot a_1 \sin(\omega t) - \omega \cdot b_1 \cos(\omega t)$$

La pulsazione elettrica ω può essere espressa in funzione della velocità angolare meccanica del rotore ω_m secondo la nota relazione:

$$\omega = 2p \cdot \omega_m \quad (2.14)$$

Nella quale p rappresenta il numero delle coppie polari del generatore. Introducendo questa espressione nella (2.8) e nella (2.11) si ottengono λ_1 ed e in funzione della velocità angolare del rotore:

$$\lambda_1(t) = a_1 \cos(2p\omega_m t) + b_1 \sin(2p\omega_m t)$$

$$e(t) = \omega_m \cdot 2p \cdot a_1 \sin(2p\omega_m t) - \omega_m \cdot 2p \cdot b_1 \cos(2p\omega_m t)$$

Ponendo $\omega_m t = \theta_m$ e introducendo questa espressione nelle due equazioni precedenti si ottengono λ_1 ed e in funzione della posizione angolare θ_m del rotore:

$$\lambda_1(\theta_m) = a_1 \cos(2p\theta_m) + b_1 \sin(2p\theta_m) \quad (2.15)$$

$$e(\theta_m) = \omega_m \cdot 2p \cdot a_1 \sin(2p\theta_m) - \omega_m \cdot 2p \cdot b_1 \cos(2p\theta_m) \quad (2.16)$$

La (2.15) e la (2.16) risultano estremamente utili ed agevoli, poichè consentono di tracciare i grafici delle funzioni del flusso concatenato, delle sue armoniche e della tensione indotta in funzione della posizione angolare θ_m .

Analisi a carico

Nel caso in cui la bobina sede di forza elettromotrice indotta venga connessa ad un carico elettrico si genera una corrente i la cui ampiezza e la cui fase dipendono dalla natura del carico alimentato. Si supponga per semplicità che il carico sia costituito da una pura resistenza; in tal caso la corrente i che attraversa la bobina risulterà essere pari a:

$$i(t) = \frac{e(t)}{R} \quad (2.17)$$

Sostituendo la forza elettromotrice indotta con la corrispondente funzione temporale espressa dalla (2.11) si ottiene una corrente descritta dalla seguente funzione:

$$i(t) = \frac{a_1 \cdot \omega}{R} \sin(\omega t) - \frac{b_1 \cdot \omega}{R} \cos(\omega t) \quad (2.18)$$

Introducendo in essa l'equazione (2.14) e l'equazione $\omega_m t = \theta_m$ si ricava la corrente generata in funzione della posizione angolare θ_m di rotore:

$$i(\theta_m) = \frac{a_1 \cdot 2p \cdot \omega_m}{R} \sin(2p\theta_m) - \frac{b_1 \cdot 2p \cdot \omega_m}{R} \cos(2p\theta_m) \quad (2.19)$$

Attraversando le nc spire della bobina di statore la corrente i genera a sua volta un flusso magnetico indotto Φ_b autoconcatenato di valore pari a:

$$\Phi_b(t) = \int_S \mu_r \mu_0 \frac{nc}{\ell} i(t) ds \quad (2.20)$$

Nella quale μ_r rappresenta la permeabilità magnetica relativa del mezzo nel quale si trova avvolta la bobina di statore, mentre ℓ rappresenta la lunghezza laterale dell'avvolgimento.

Il flusso magnetico indotto Φ_b dalla corrente i distorce ulteriormente il flusso magnetico principale generato dai magneti permanenti di statore, pertanto il flusso risultante sarà pari a:

$$\Phi_T(t) = \Phi_c(t) + \Phi_b(t) \quad (2.21)$$

Il contenuto armonico del flusso risultante Φ_T sarà ovviamente diverso dal contenuto armonico del solo flusso prodotto dai magneti permanenti di statore; pertanto risulteranno diverse ciascuna delle componenti armoniche:

$$\Phi_T(t) = F_{To} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_{Tk} \cos(k\omega t) + b_{Tk} \sin(k\omega t)]$$

Conseguentemente la prima armonica sarà caratterizzata dalla funzione:

$$\lambda_{T1}(t) = a_{T1} \cos(\omega t) + b_{T1} \sin(\omega t)$$

Di valore efficace e fase rispettivamente pari a:

$$F_{T1} = \sqrt{\frac{a_{T1}^2 + b_{T1}^2}{2}}$$

$$\phi_{T1} = \arctan \left(-\frac{b_{T1}}{a_{T1}} \right)$$

Di conseguenza l'espressione della tensione indotta secondo la (2.11) diventerà pari a:

$$e(t) = \omega \cdot a_{T1} \sin(\omega t) - \omega \cdot b_{T1} \cos(\omega t)$$

Conseguentemente, valore efficace e fase saranno rispettivamente pari a:

$$V_{T1} = \omega \cdot F_{T1}$$

$$\alpha_{T1} = \arctan \left(\frac{a_{T1}}{b_{T1}} \right)$$

Equazioni di Maxwell

Sia nel funzionamento a vuoto che nel funzionamento a carico in ciascun punto del modello di microturbina progettato sarà presente un campo di induzione magnetica \dot{B} di intensità più o meno elevata. In ciascun punto del modello sarà certamente presente anche un campo magnetico \dot{H} correlato al campo di induzione magnetica dalla nota relazione costitutiva:

$$\dot{B} = \mu \dot{H}$$

Nella quale μ rappresenta la permeabilità magnetica del materiale misurata in [H/m]. Le linee di forza del campo di induzione magnetica presenti nel modello saranno certamente delle linee chiuse; questo significa che il dominio analizzato non presenta né “sorgenti” né “pozzi” di campo magnetico. Questa osservazione permette di considerare il campo \dot{B} solenoidale, ovvero in grado di soddisfare la relazione:

$$\nabla \cdot \dot{B} = 0$$

Essendo pertanto il dominio a connessione superficiale semplice ed il campo \dot{B} solenoidale è certamente possibile definire un potenziale vettore magnetico \dot{A} , legato al campo di induzione magnetica dalla relazione:

$$\nabla \times \dot{A} = \dot{B} \quad (2.22)$$

Il campo magnetico \dot{H} ed il campo densità di corrente \dot{J} saranno tra loro legati dalla nota legge di Ampere qui di seguito riportata:

$$\nabla \times \dot{H} = \dot{J} + \left(\frac{d\dot{D}}{dt} \right)$$

Essendo le frequenze in gioco relativamente basse è del tutto lecito trascurare la derivata temporale del vettore spostamento elettrico \dot{D} . La rotazione del rotore determina la variazione del flusso concatenato Φ_c con la bobina di statore, conseguentemente determina la nascita di un campo elettrico indotto \dot{E} che dovrà certamente obbedire alla legge dell'induzione elettromagnetica:

$$\nabla \times \dot{E} = - \frac{d\dot{B}}{dt}$$

Il campo elettrico indotto \dot{E} determina la presenza di un vettore spostamento elettrico \dot{D} ad esso legato dalla relazione costitutiva:

$$\dot{D} = \varepsilon \cdot \dot{E}$$

Nella quale ε rappresenta la permittività del materiale misurata in [F/m]. Infine il vettore spostamento elettrico \dot{D} dovrà certamente soddisfare la legge di Gauss:

$$\nabla \cdot \dot{D} = \delta$$

Nella quale δ rappresenta la densità volumica di carica elettrica misurata in [C/m³]. Per comodità vengono elencate in successione le equazioni di maggior rilievo precedentemente analizzate:

$$\nabla \cdot \dot{B} = 0 \quad (2.23)$$

$$\nabla \times \dot{H} = \dot{J} + \left(\frac{d\dot{D}}{dt} \right) \quad (2.24)$$

$$\nabla \times \dot{E} = - \frac{d\dot{B}}{dt} \quad (2.25)$$

$$\nabla \cdot \dot{D} = \delta \quad (2.26)$$

In aggiunta alle relazioni costitutive:

$$\dot{B} = \mu \cdot \dot{H} \quad (2.27)$$

$$\dot{D} = \varepsilon \cdot \dot{E} \quad (2.28)$$

$$\dot{E} = \rho \cdot \dot{J} \quad (2.29)$$

Esse costituiscono le equazioni fondamentali dell'elettromagnetismo e la loro risoluzione mediante un opportuno codice di simulazione consentirà, come vedremo nel paragrafo successivo, di analizzare il comportamento elettromagnetico di qualunque modello di generatore, anche del più complesso.

Si ritiene infine opportuno descrivere altre due grandezze di notevole interesse che verranno analizzate mediante codice di simulazione, ovvero l'**energia** e la **coenergia** magnetica. L'energia magnetica si può definire da un punto di vista fisico come l'attitudine o capacità da parte dei campi \dot{B} ed \dot{H} di compiere lavoro, la sua presenza è pertanto ad essi strettamente correlata. Si consideri inizialmente un materiale magneticamente lineare, ossia caratterizzato da una curva di magnetizzazione rettilinea:

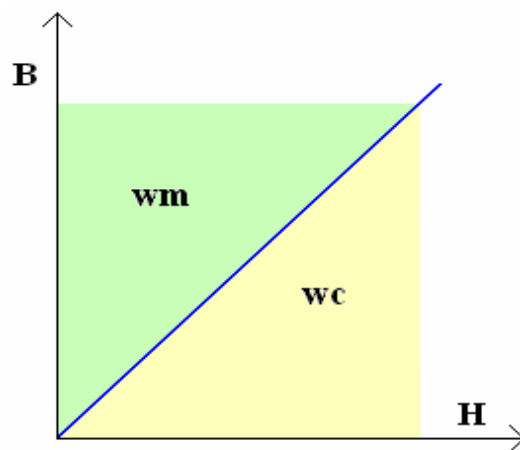


Fig. 2.2: Esempio di curva di magnetizzazione (materiale magneticamente lineare)

Viene definita densità di energia magnetica w_m l'area compresa tra la retta di magnetizzazione e l'asse delle ordinate sul quale sono riportati i valori del campo d'induzione magnetica \dot{B} . La densità di energia magnetica di un mezzo lineare risulterà dunque sempre pari a:

$$w_m = \frac{B \cdot H}{2}$$

Introducendo la relazione costitutiva (2.27) si ottiene la densità di energia magnetica in funzione del solo campo magnetico:

$$w_m = \frac{\mu \cdot H^2}{2} \quad (2.30)$$

Analogamente si definisce densità di coenergia magnetica w_c l'area compresa tra la retta di magnetizzazione e l'asse delle ascisse nel quale sono riportati i valori del campo magnetico H . Essa risulterà dunque pari a:

$$w_c = \frac{B \cdot H}{2} = \frac{\mu \cdot H^2}{2}$$

Considerando un volume τ che delimita la regione di spazio nella quale sono contenuti i campi \vec{B} ed \vec{H} , si definisce energia magnetica l' integrale di volume della densità di energia magnetica w_m , ovvero:

$$W_m = \int_{\tau} w_m d\tau = \frac{1}{2} \int_{\tau} \mu H^2 d\tau \quad (2.31)$$

In modo del tutto analogo si definisce coenergia magnetica l' integrale di volume della densità di coenergia magnetica:

$$W_c = \int_{\tau} w_c d\tau = \frac{1}{2} \int_{\tau} \mu H^2 d\tau \quad (2.32)$$

Appare dunque evidente che energia e coenergia magnetica risultano sempre uguali in un mezzo magneticamente lineare, indipendentemente dal valore della permeabilità magnetica μ del materiale. Consideriamo ora un materiale ferromagnetico la cui curva di magnetizzazione non sia lineare, come riportato nella sottostante figura:

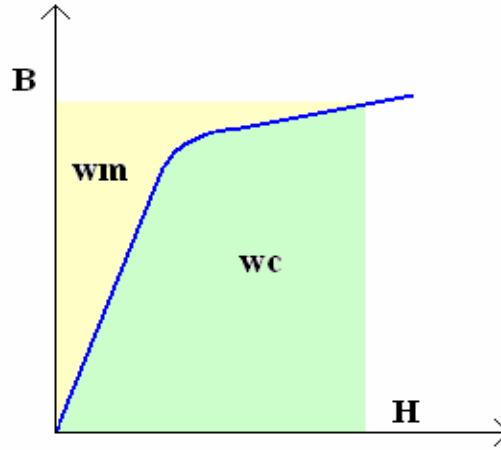


Fig. 2.3: Esempio di curva di magnetizzazione (materiale magneticamente non lineare)

Le densità di energia e coenergia magnetica risulteranno in questo caso pari ai seguenti integrali di superficie:

$$w_m = \int_0^B H dB \quad (2.33)$$

$$w_c = \int_0^H B dH \quad (2.34)$$

Di conseguenza le corrispondenti energia e coenergia magnetica saranno espresse dai seguenti integrali di volume:

$$W_m = \int_0^{\tau} w_m d\tau = \int_0^{\tau} \int_0^B H dB d\tau \quad (2.35)$$

$$W_c = \int_0^{\tau} w_c d\tau = \int_0^{\tau} \int_0^H B dH d\tau \quad (2.36)$$

Relazioni caratteristiche di un mezzo magneticamente non lineare.

2.1.3 Simulazione mediante software FEMM

Dopo aver eseguito una accurata descrizione teorica del comportamento fisico del modello progettato, descrivendo con particolare attenzione le principali grandezze elettromagnetiche che entrano in gioco, il passo successivo è stato quello di analizzare il comportamento del modello di microturbina progettato mediante l'ausilio di un opportuno programma di simulazione.

I programmi di simulazione presentano notevoli vantaggi, in quanto risolvono le equazioni descrittive del problema elettromagnetico in tempi brevissimi, consentono la perfetta ripetibilità del processo di analisi del modello per diversi valori di uno stesso parametro, sono in grado di trasmettere dati ad altri programmi di calcolo permettendo una rapida rielaborazione dei risultati ed il tracciamento dei relativi grafici, consentono all'utente di definire il modello da porre sotto analisi in modo semplice e diretto, ed infine garantiscono una precisione della soluzione non ottenibile con altri metodi di analisi. Tra i vari programmi di simulazione esistenti si è deciso di utilizzare il codice FEMM per i seguenti motivi:

- È un codice di simulazione il cui processo risolutivo prevede l'applicazione del metodo agli **elementi finiti**, garantendo quindi la massima precisione dei risultati ottenuti.
- A differenza di altri programmi di simulazione che si basano sullo stesso processo risolutivo (ad esempio FLUX) vanta il pregio di essere molto più semplice ed intuitivo, agevolando non poco il compito dell'utente.
- È un programma di simulazione appositamente predisposto alla comunicazione con il linguaggio di programmazione LUA; questo consente all'utente di impartire ordini al FEMM tramite file script scritti direttamente in codice LUA.
- È il programma di simulazione adottato nel corso di "Progettazione di macchine elettriche", personalmente questo mi ha consentito di utilizzare uno strumento di analisi del tutto familiare.

Si ritiene opportuno riportare qui di seguito una descrizione dell'ambiente di lavoro FEMM, soffermandosi in particolare sulle procedure principali da seguire al fine di eseguire la simulazione di un modello di macchina elettrica progettato:

Schermata iniziale

Appena si clicca sull'icona femm.exe appare la schermata iniziale del programma, nella quale l'utente può iniziare a disegnare il modello di macchina elettrica progettato e che intende analizzare. Si riporta qui di seguito l'immagine della videata iniziale, nella quale si notano le due principali barre dei comandi (la prima orizzontale collocata in alto, la seconda verticale posta a sinistra) ed il reticolo mappato:

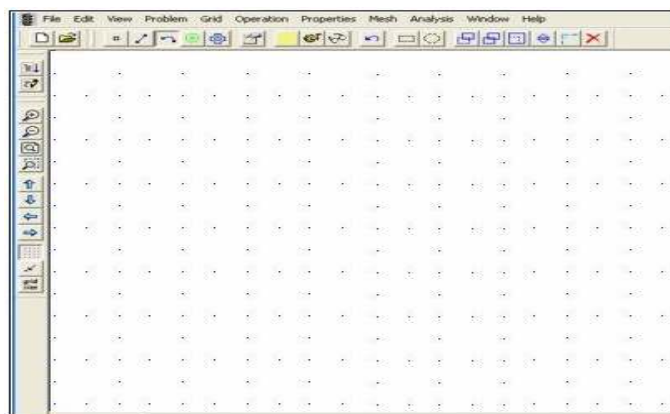


Fig. 2.4: Schermata iniziale del programma FEMM

La presenza della griglia consente l'impostazione della distanza da punto a punto, e quindi permette l'attivazione dello snap proprio come se si disegnasse il modello in AUTOCAD. Questa caratteristica consente all'utente di disegnare il modello tracciando punti e linee con estrema facilità, rendendo la fase di rappresentazione della geometria semplice e veloce.

Nel caso in cui la geometria del modello risultasse particolarmente complessa è consigliabile eseguire il disegno direttamente in AUTOCAD e poi importare il modello in FEMM; esiste infatti una opzione del menù file che consente all'utente di svolgere questa operazione.

Definizione del problema

Prima di procedere con la rappresentazione della geometria della microturbina da analizzare è necessario definire il tipo di problema da risolvere, ovvero introdurre i dati iniziali richiesti dal programma necessari alla definizione della fisica del modello ed alla sua successiva risoluzione. Definire il problema da porre sotto analisi significa sostanzialmente introdurre i seguenti dati preliminari:

- *Problem type*: questa voce chiede all'utente di introdurre il "tipo di problema" da porre sotto analisi, ovvero permette la scelta tra un modello geometrico di tipo **planare** ed un modello geometrico di tipo **assialsimmetrico**. Un modello a geometria planare è costituito da infinite superfici che presentano le stesse caratteristiche lungo l'asse Z ; in questo caso è pertanto sufficiente sviluppare la geometria del modello sul piano $X - Y$ ed introdurre successivamente il valore della profondità. Un modello si definisce invece di tipo assialsimmetrico quando la geometria, le proprietà dei materiali e le sorgenti di campo presentano una simmetria rotatoria intorno ad un asse.
- *Length units*: questa voce richiede l'introduzione dell'unità di misura della lunghezza e permette all'operatore di scegliere tra le seguenti possibilità: millimetri, centimetri, metri, pollici e miglia.
- *Frequency*: la presenza di questa casella consente all'utente l'introduzione della frequenza delle sorgenti di campo presenti nel modello.
- *Depth*: in questa casella viene richiesto all'operatore di introdurre il valore della profondità del modello da analizzare.
- *Solver precision*: questa voce consente di specificare il criterio di arresto del processo risolutivo implementato dal programma per eseguire l'analisi del modello. Il metodo agli **elementi finiti** trasforma un problema di analisi vettoriale integro-differenziale in un problema di algebra lineare del tipo $Mx = b$; dove M è una matrice quadrata, b è il vettore dei termini noti ed x rappresenta il vettore delle incognite da determinare. L'introduzione del valore di *solver precision* (precisione della soluzione) impone il massimo valore ammissibile al termine $\|b - Mx\|/\|b\|$. Nel caso in cui non venga specificato, il programma impone il valore di default 10^{-8} .

Disegno della geometria

Dopo aver introdotto i dati iniziali necessari a definire il tipo di problema il passo successivo è quello di disegnare la geometria del modello da analizzare. Come già accennato in precedenza il software FEMM consente all'utente di impostare una griglia con le caratteristiche desiderate, ovvero imponendo la distanza da punto a punto e dando la possibilità di attivare o meno lo snap; proprio come si è soliti procedere disegnando con AUTOCAD.

Si consiglia di procedere nella realizzazione della figura prima impostando i punti, successivamente tracciare le linee collegando i punti precedentemente inseriti, ed infine realizzare gli eventuali archi di circonferenza. Il software consente inoltre un vasta gamma di funzionalità; ad esempio copiare, traslare e ruotare punti, linee o addirittura intere porzioni del modello.

Nella sottostante figura viene riportata la geometria del primo modello di microturbina progettato, realizzata mediante l'ausilio della griglia del software FEMM:

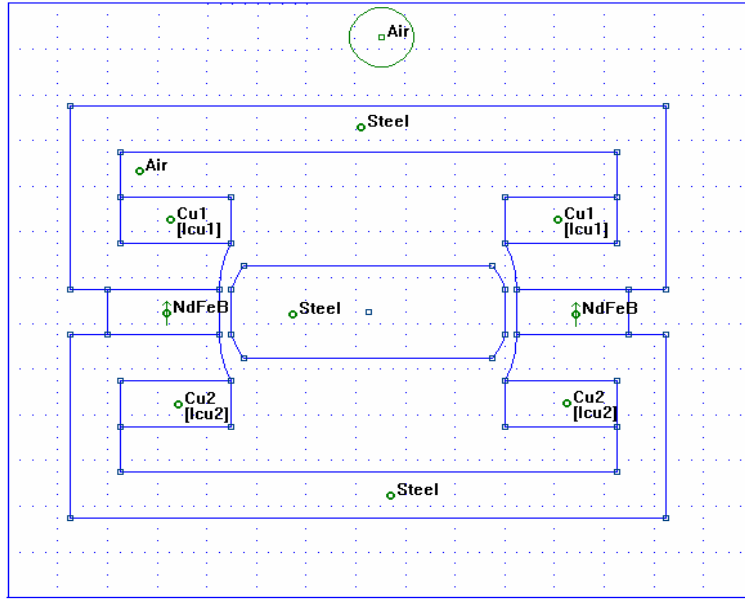


Fig. 2.5: Primo modello di microturbina
(realizzato con FEMM)

Condizioni al contorno

Dopo aver disegnato accuratamente la geometria del modello da analizzare è necessario specificare le cosiddette “condizione al contorno” meglio note con il termine di *Boundary conditions*. L'imposizione delle condizioni al contorno consiste nell'assegnare informazioni riguardanti il potenziale vettore magnetico \vec{A} sulle linee che delimitano la geometria del modello realizzato; in particolare è possibile imporre due differenti condizioni al contorno:

- *Condizione di Neumann*: imporre questa condizione significa assegnare il valore della derivata normale del potenziale vettore magnetico \vec{A} lungo una o più linee di confine; ad esempio l'assegnazione $\frac{d\vec{A}}{dn} = 0$ forza il flusso magnetico Φ ad attraversare ortogonalmente la linea di confine sulla quale è stata impostata tale condizione.
- *Condizione di Dirichlet*: imporre questa condizione significa assegnare il valore del potenziale vettore magnetico \vec{A} lungo una o più linee di confine; ad esempio l'assegnazione $\vec{A} = 0$ impedisce al flusso magnetico Φ di attraversare il contorno, forzandolo a rimanere tangente alla linea di confine sulla quale è stata imposta tale condizione.

Definizione dei materiali

Disegnata la geometria del modello e definite le condizioni al contorno occorre definire per ogni regione (per regione si intende una qualunque superficie chiusa priva di punti e linee al suo interno) il materiale di cui essa è costituita. Occorre inoltre specificare per ogni materiale le grandezze fisiche che ne descrivono il comportamento elettromagnetico, inserendone i valori seguiti dalle corrispettive unità di misura. I materiali definiti in questo modello di microturbina e le loro caratteristiche sono qui di seguito riportati:

- *Acciaio*:
è il materiale ferromagnetico con il quale si prevede di realizzare il rotore ed il nucleo di statore della microturbina, è caratterizzato dalle seguenti grandezze fisiche:
 - permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 760$
 - permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 760$

- curva di magnetizzazione $B = f(H)$ non lineare:

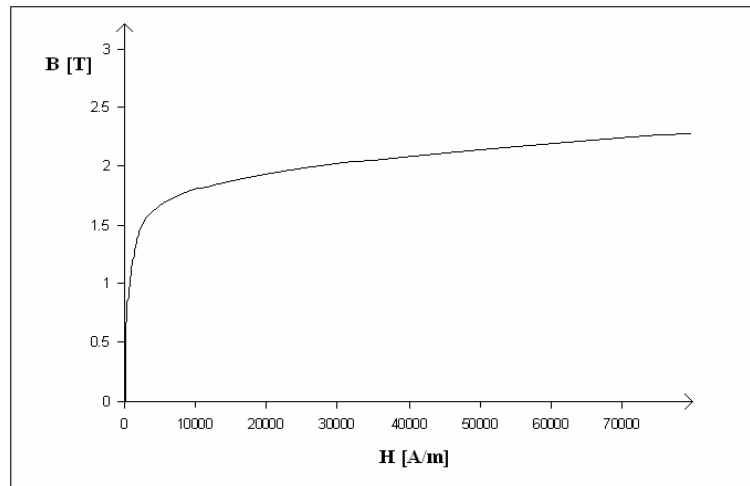


Fig. 2.6: Curva di magnetizzazione dell' acciaio

- *Lega di Neodimio:*

è il materiale con il quale si prevede di realizzare i magneti permanenti della microturbina, ossia la principale sorgente di campo magnetico. In particolare il materiale magnetico impiegato è una lega di Neodimio Ferro e Boro (NdFeB) e presenta le seguenti caratteristiche:

- permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 1.048$
- permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 1.048$
- campo coercitivo: $H_c = 950000$ [A/m].
- conducibilità elettrica: $\sigma = 0.667$ [Ms/m].
- induzione magnetica residua: $B_{rem} = 1.05$ [T].
- curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare:

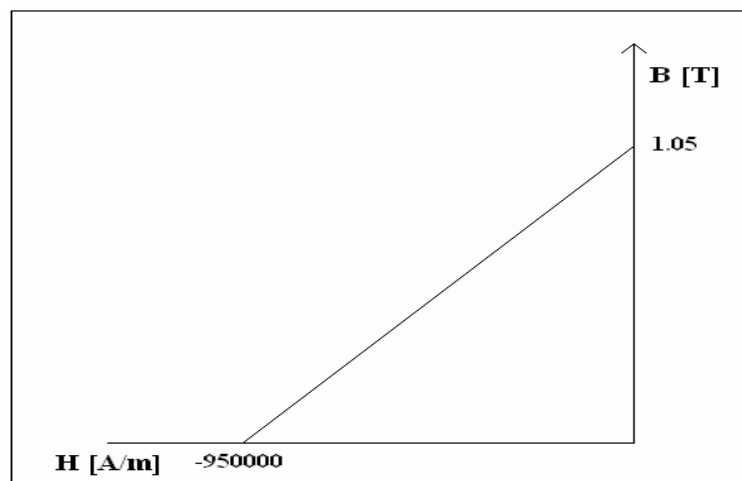


Fig. 2.7: Curva di magnetizzazione del NdFeB

- *Aria:*

è il materiale che circonda il modello di microturbina che si prevede di realizzare, esso sarà caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:

- permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
- conducibilità elettrica $\sigma = 0$ [Ms/m].
- *Rame:*
 - è il materiale con il quale si prevede di realizzare l' avvolgimento di statore sede di forza elettromotrice indotta, esso sarà caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:
 - permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
 - conducibilità elettrica $\sigma = 58$ [Ms/m].
 - curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare.

Definizione delle sorgenti

Successivamente alla definizione dei materiali e delle loro caratteristiche fisiche è necessario definire le sorgenti di campo magnetico presenti nel modello; esse sono sostanzialmente **magneti permanenti** e **correnti elettriche**.

Per definire la presenza di un magnete permanente è sufficiente attribuire alla regione nella quale è situato tutte le sue caratteristiche magnetiche: campo coercitivo, induzione residua, curva di magnetizzazione ecc.. in aggiunta alla direzione di magnetizzazione, ossia la direzione principale lungo la quale agisce il flusso magnetico da esso prodotto.

Per definire invece la presenza di una corrente si possono seguire due procedimenti del tutto equivalenti: il primo metodo consiste nell' assegnare alla regione percorsa da corrente la corrispondente densità di corrente elettrica (come se essa fosse a tutti gli effetti una proprietà di quella regione), il secondo metodo consiste nel definire la corrente desiderata come una sorgente a se stante, assegnandone le componenti reale e complessa ed introducendo successivamente tale sorgente nelle regioni prestabilite.

Creazione della mesh

L' applicazione del metodo agli elementi finiti consente di trasformare un problema integro-differenziale in un problema di algebra lineare (e quindi sempre risolvibile). Per poter applicare tale metodo è però necessario "discretizzare" il dominio corrispondente al modello di microturbina disegnato, ossia ricoprire tutta la superficie occupata dal modello di poligoni elementari (generalmente triangoli). Tanto più piccoli sono gli elementi che ricoprono il dominio e tanto più precisa risulterà la soluzione, a fronte però di una minore velocità computazionale.

Il software FEMM prevede un' opzione che consente la creazione automatica della mesh, tuttavia si consiglia l' utente di modificarne le impostazioni predefinite in modo tale da ottenere elementi sufficientemente piccoli ed una mappatura del dominio più fitta nelle zone di maggiore interesse. Si riporta qui di seguito la mesh realizzata al fine di avviare il processo di analisi del primo modello di microturbina progettato:

Processo di analisi

A questo punto, dopo la creazione della mesh, il modello progettato è pronto per essere analizzato. Per avviare il processo di simulazione è sufficiente cliccare sull' apposito tasto della barra orizzontale dei comandi; in questo modo si dà il via alla procedura di analisi che consentirà la risoluzione del problema definito. Ma che cosa avviene esattamente durante il processo di analisi? Quali formule vengono implementate al fine della risoluzione del problema?

Per rispondere a queste domande è necessario riprendere le equazioni di Maxwell e le corrispondenti relazioni costitutive già esaminate in precedenza. Innanzitutto conviene suddividere i problemi di natura elettromagnetica in due categorie: problemi magnetostatici e problemi quasi magnetostatici.

Problemi magnetostatici

Tutti i modelli fisici denominati magnetostatici sono caratterizzati dal fatto che le derivate temporali dei campi vettoriali definiti in precedenza sono tutte rigorosamente nulle; sotto queste

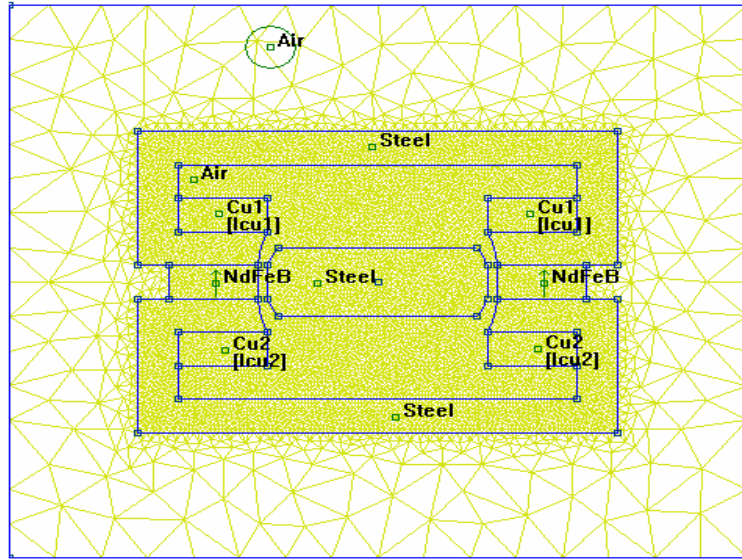


Fig. 2.8: Esempio di mesh triangolare

ipotesi l'equazione di Maxwell (2.24) risulta pari a:

$$\nabla \times \dot{H} = \dot{J}$$

Si consideri inoltre la relazione costitutiva (2.27), nella quale viene messo in evidenza il campo magnetico \dot{H} :

$$\dot{H} = \frac{\dot{B}}{\mu}$$

Introducendo la suddetta relazione nell'equazione (2.24) si ottiene l'espressione del campo densità di corrente \dot{J} in funzione del campo di induzione magnetica \dot{B} :

$$\nabla \times \left(\frac{\dot{B}}{\mu} \right) = \dot{J}$$

Essendo in questo genere di modelli il campo \dot{B} solenoidale, esso sarà certamente correlato ad un potenziale vettore magnetico \dot{A} per mezzo dell'equazione (2.22)

$$\dot{B} = \nabla \times \dot{A}$$

Introducendo la suddetta relazione nell'equazione precedente si ottiene il vettore densità di corrente \dot{J} in funzione del potenziale vettore magnetico \dot{A} , ovvero:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{A} \right) = \dot{J} \quad (2.37)$$

Considerando tutti i materiali definiti nel modello lineari e isotropi, la permeabilità magnetica μ può essere ritenuta costante in tutti i punti di uno stesso materiale, pertanto la (2.37) diventa:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \dot{A} = \dot{J} \quad (2.38)$$

Nell'equazione (2.38) appare come unica incognita il potenziale vettore magnetico \dot{A} , poichè il valore di permeabilità magnetica μ è stato introdotto come dato durante la definizione dei materiali, ed il campo \dot{J} è noto in quanto sono state definite dall'utente le correnti elettriche presenti nel modello. Durante il processo di analisi il FEMM applica il metodo agli elementi finiti per risolvere l'equazione (2.38), fornendo come risultato il valore del potenziale vettore

magnetico \dot{A} in ogni punto del dominio.

Non è stato ritenuto opportuno affrontare in questa tesi una trattazione riguardante il metodo agli elementi finiti e le sue caratteristiche, sia per motivi di tempo, sia perchè una sua eventuale trattazione sconfinerebbe dai veri obiettivi prefissati per questo lavoro di tesi.

Una volta determinato il potenziale vettore magnetico \dot{A} il software FEMM determina facilmente anche i vettori \dot{B} ed \dot{H} semplicemente implementando le equazioni (2.22) e (2.27), ovvero:

$$\begin{aligned}\dot{B} &= \nabla_{\times} \dot{A} \\ \dot{H} &= \frac{\dot{B}}{\mu}\end{aligned}$$

Problemi magnetostatici quasi stazionari

Il software FEMM è in grado di risolvere anche problemi magnetostatici di natura quasi stazionaria, ovvero nei quali la derivata temporale del campo di induzione magnetica \dot{B} non è nulla. Per affrontare questa categoria di sistemi fisici è necessario considerare tutte le equazioni di Maxwell. L'equazione di partenza è la relazione (2.25) nota con il nome di legge dell'induzione elettromagnetica:

$$\nabla_{\times} \dot{E} = \frac{d\dot{B}}{dt}$$

Introducendo nella suddetta espressione l'equazione (2.22) si ottiene:

$$\nabla_{\times} \dot{E} = -\frac{d(\nabla_{\times} \dot{A})}{dt} = -\nabla_{\times} \left(\frac{d\dot{A}}{dt} \right)$$

Portando tutti i termini al primo membro e raccogliendo l'operatore lineare rotore si ottiene la seguente espressione equivalente:

$$\nabla_{\times} \left(\dot{E} + \frac{d\dot{A}}{dt} \right) = 0 \quad (2.39)$$

Definiamo ora una funzione potenziale scalare V tale che il suo gradiente sia pari al termine tra parentesi della (2.39) ovvero:

$$-\nabla V = \dot{E} + \frac{d\dot{A}}{dt}$$

Nella quale si riporta al primo membro il vettore campo elettrico \dot{E} :

$$\dot{E} = -\nabla V - \frac{d\dot{A}}{dt} \quad (2.40)$$

Si introduca ora la (2.40) nell'equazione costitutiva (2.29), in modo da ottenere la seguente espressione:

$$\rho \cdot \dot{J} = -\nabla V - \frac{d\dot{A}}{dt}$$

Dalla quale si ricava il vettore densità di corrente \dot{J} , ovvero:

$$\dot{J} = -\sigma \left(\nabla V + \frac{d\dot{A}}{dt} \right)$$

Si introduca ora l'espressione di \dot{J} così trovata nella (2.37) in modo da ottenere la seguente relazione:

$$\nabla_{\times} \left(\frac{1}{\mu} \nabla_{\times} \dot{A} \right) = -\sigma \left(\nabla V + \frac{d\dot{A}}{dt} \right)$$

La quale una volta riordinata rappresenta l'equazione descrittiva dei problemi elettromagnetici di natura quasi stazionaria:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \dot{A} \right) + \sigma \frac{d\dot{A}}{dt} = -\sigma \nabla V \quad (2.41)$$

Ritenendo il modello costituito di materiali lineari e isotropi, è possibile raccogliere la permeabilità magnetica μ , ottenendo la relazione:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \dot{A} + \sigma \frac{d\dot{A}}{dt} = -\sigma \nabla V \quad (2.42)$$

In questo caso il software FEMM risolve l'equazione (2.42) implementando il metodo agli elementi finiti, ottenendo il valore del potenziale vettore magnetico \dot{A} in ogni punto del modello. Le equazioni (2.38) e (2.42) descrivono un'ampia tipologia di problemi elettromagnetici e la loro risoluzione consente di stimare tutti i campi vettoriali che descrivono il comportamento elettromagnetico del modello progettato; questo è dunque ciò che avviene durante la fase di analisi.

Visualizzazione dei risultati

Al termine del processo di analisi i risultati ottenuti si possono visualizzare nella cosiddetta "femmview", ovvero una finestra di dialogo nella quale compare il modello disegnato. Tale finestra grafica presenta una barra dei comandi orizzontale che permette all'utente di rilevare il valore della grandezza desiderata punto per punto (nel caso si tratti di un campo vettoriale) o in un prefissato volume. La "femmview" che compare al termine del processo di simulazione viene qui di seguito riportata:

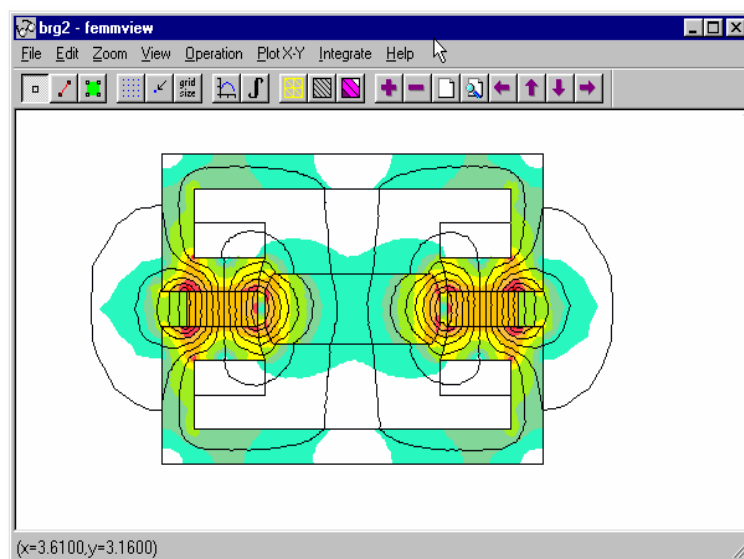


Fig. 2.9: Codice FEMM - Visualizzazione dei risultati

Tale finestra di dialogo consente all'utente di rilevare il valore di tutti i campi vettoriali precedentemente definiti in ogni punto del dominio, inoltre consente la stima dell'energia e della coenergia magnetica in tutto il volume occupato dal modello.

Oltre al modello disegnato, nella femmview compaiono linee chiuse concentriche; esse rappresentano le linee di flusso del campo di induzione magnetica \dot{B} e saranno tanto più dense quanto maggiore risulterà il flusso magnetico in quella regione. Si può inoltre notare che il modello disegnato compare colorato; ad ogni colore è infatti associata una ben precisa densità di campo di induzione magnetica, in particolare al rosso corrisponde la densità massima mentre al verde chiaro corrisponde la densità minima. Il programma FEMM prevede inoltre un'opzione che consente all'utente di stimare la coppia T che agisce sul rotore semplicemente selezionando la

superficie rotorica e cliccando sull' etichetta *Torque via Weighted Stress Tensor*. Tutto questo e altro verrà descritto più dettagliatamente nei successivi paragrafi.

2.1.4 Simulazione del modello a vuoto

Il modello di microturbina progettato funziona a vuoto quando l'avvolgimento di statore sede di forza elettromotrice indotta non è connesso ad alcun carico elettrico, e conseguentemente non viene percorso da corrente.

In questo caso l'unica sorgente di campo magnetico presente è costituita dai magneti permanenti posti sullo statore, i quali producono il flusso principale Φ che concatena il rotore attraversando il traferro in aria.

Il risultato della simulazione di questo primo modello di microturbina funzionante a vuoto viene qui di seguito riportato, nel quale si notano le linee di flusso ed i colori che rappresentano le differenti densità di campo di induzione magnetica:

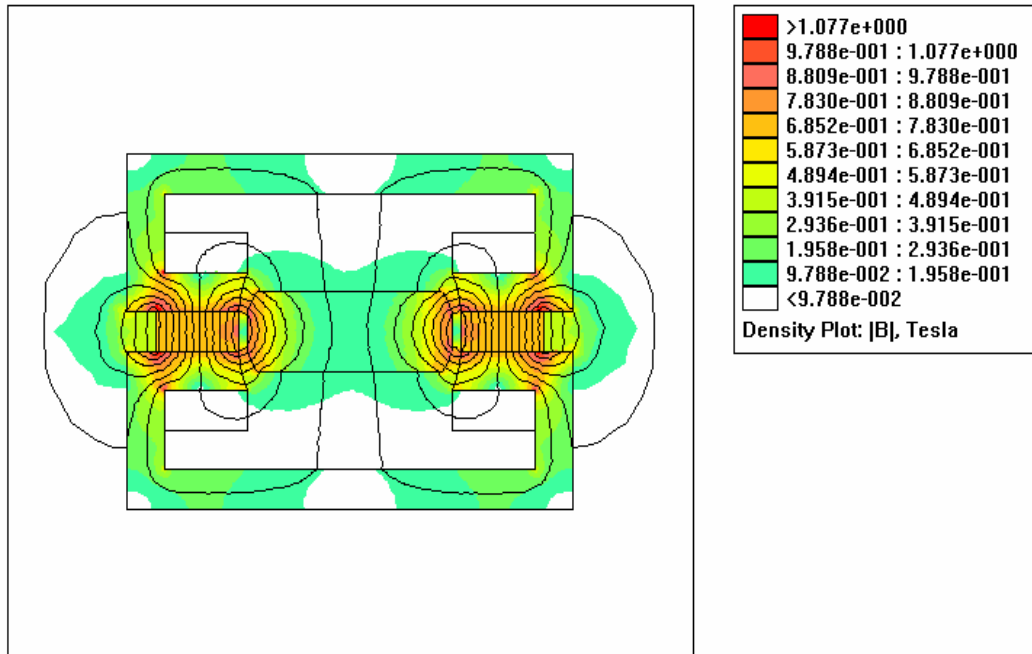


Fig. 2.10: Simulazione a vuoto del primo modello

Come precedentemente accennato la finestra grafica “femmvview” consente all'utente di rilevare in ogni punto del modello il valore dei principali campi vettoriali (in modulo o nelle loro componenti x e y) implementando il metodo agli elementi finiti, risolvendo così le equazioni di Maxwell descrittive del modello elettromagnetico.

Vediamo più dettagliatamente quali sono le grandezze di maggior interesse sulle quali vale la pena di porre particolare attenzione, ed in che modo l'utente ne può rilevare il valore nei diversi punti del modello:

Potenziale vettore magnetico

Ritenendo i materiali che costituiscono le diverse regioni del modello simulato lineari, omogenei ed isotropi il potenziale vettore magnetico \vec{A} viene stimato mediante l'applicazione del metodo agli elementi finiti per risolvere l'equazione (2.38) descrittiva dei sistemi fisici di natura magnetostatica, ovvero:

$$-\frac{1}{\mu} \nabla^2 \vec{A} = \vec{j}$$

L'utente è in grado di rilevare il modulo di \vec{A} (nei modelli 2D presenta solamente componente lungo z) semplicemente cliccando sul punto del dominio nel quale desidera conoscerne il valore. In questo modo viene restituito il valore della componente A_z del potenziale vettore magnetico espresso in [Wb/m].

L'opzione **Plot X-Y** della femmview consente inoltre all'utente di creare grafici dei moduli dei campi vettoriali \dot{A} , \dot{B} ed \dot{H} in funzione della lunghezza. Si riporta qui di seguito l'andamento della componente A_z del potenziale vettore magnetico in funzione della lunghezza del traferro, considerando il rotore nella sua posizione iniziale come in Fig.2.10:

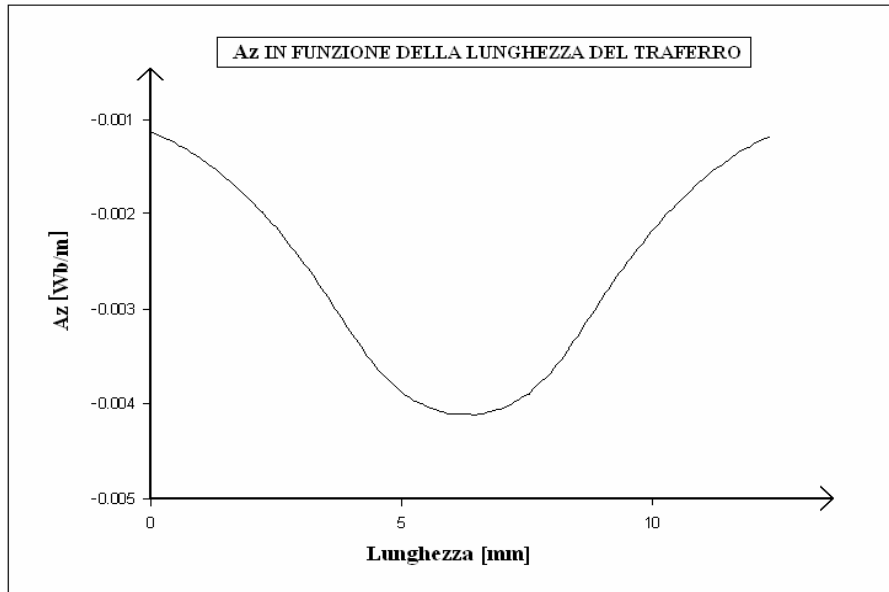


Fig. 2.11: Componente A_z del potenziale vettore magnetico al traferro

Campo di induzione magnetica

Una volta noto il potenziale vettore magnetico \dot{A} il campo di induzione magnetica \dot{B} viene ricavato dall'equazione (2.22) ovvero:

$$\nabla \times \dot{A} = \dot{B}$$

Viene qui di seguito riportato il grafico del modulo del campo \dot{B} in funzione della lunghezza del traferro, considerando come in precedenza il rotore nella sua posizione iniziale:

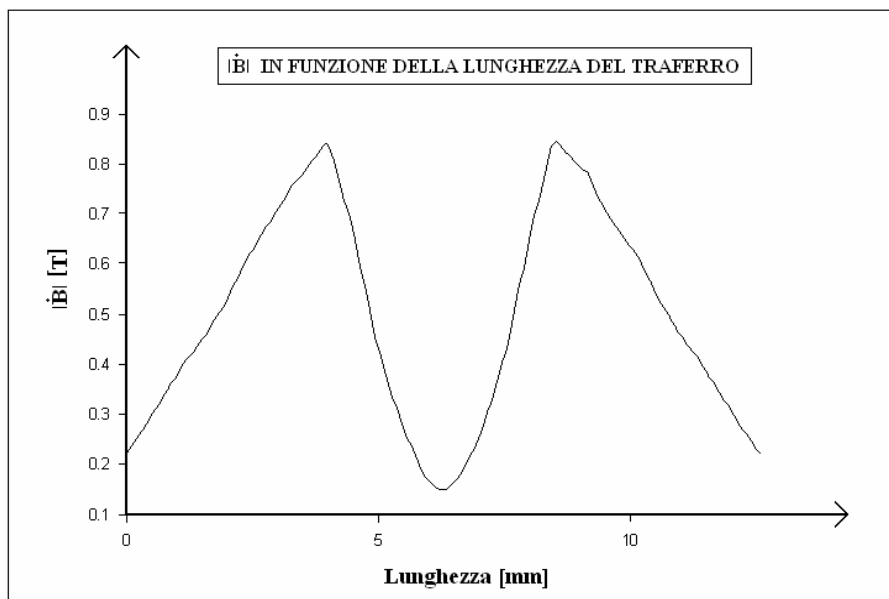


Fig. 2.12: Modulo del campo di induzione magnetica al traferro

Come si può notare dalla Fig.2.12 il modulo del vettore campo \dot{B} prodotto al traferro risulta particolarmente discontinuo; esso presenta infatti due picchi di valore prossimo ai 0.8 [T] mentre si riduce notevolmente in corrispondenza dell'asse del rotore fino al valore di 0.15 [T].

Campo magnetico

Il valore del campo magnetico \dot{H} viene dedotto per mezzo della relazione costitutiva (2.27), a patto che siano state introdotte correttamente tutte le permeabilità magnetiche caratteristiche dei materiali con i quali si prevede di realizzare il modello progettato. Anche in questo caso la zona di maggiore interesse sulla quale soffermare la nostra attenzione è sempre il traferro, ovvero lo spazio d'aria compreso tra i magneti permanenti ed il rotore.

Viene qui di seguito riportato il grafico corrispondente al $|\dot{H}|$ in funzione della lunghezza del traferro, considerando come sempre il rotore nella sua posizione iniziale:

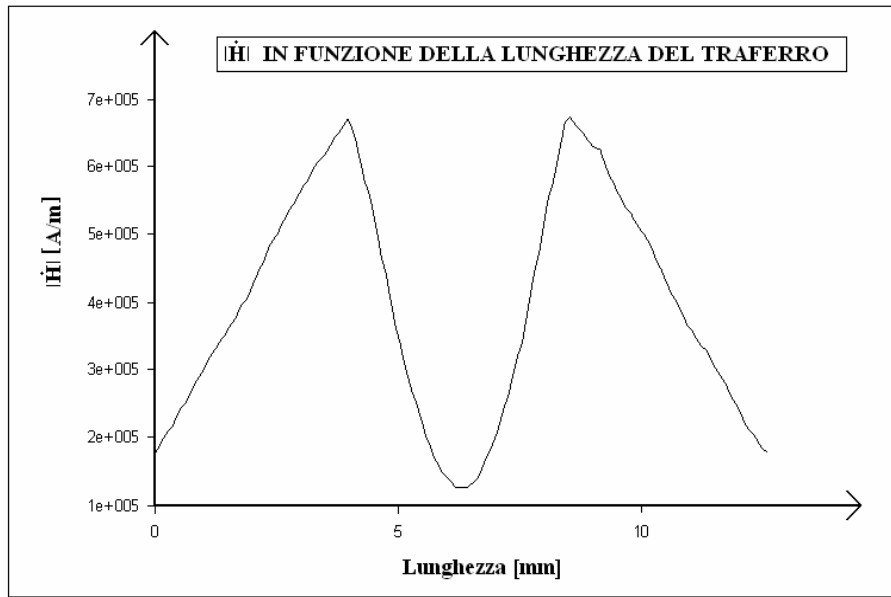


Fig. 2.13: Modulo del campo magnetico al traferro

Come si può notare dai corrispettivi grafici, l'andamento al traferro dei moduli dei campi \dot{B} ed \dot{H} coincidono perfettamente. Questo è esattamente quanto ci si poteva attendere, poichè essendo la permeabilità magnetica μ_0 dell'aria che costituisce il traferro costante e pari a $4\pi \cdot 10^{-7}$ [H/m], $|\dot{B}|$ e $|\dot{H}|$ risultano legati da proporzionalità diretta; in virtù della relazione costitutiva (2.27).

Flusso concatenato

Un'altra grandezza di notevole interesse sulla quale vale la pena di porre attenzione è il flusso concatenato con l'avvolgimento di statore, il quale può essere stimato con la seguente relazione ricavata dalla (2.22) e applicata al caso bidimensionale:

$$\Phi_c = \frac{n_c \cdot L_z}{S_{cu}} \left(\int_{S1} A_z dz - \int_{S2} A_z dz \right) \quad (2.43)$$

Nella quale n_c rappresenta il numero di spire dell'avvolgimento, L_z rappresenta la lunghezza assiale del modello, S_{cu} denota la sezione totale dell'avvolgimento, mentre il termine tra parentesi esprime la differenza tra gli integrali della componente A_z del potenziale vettore magnetico determinati sulle sezioni superiore $S1$ ed inferiore $S2$ della bobina sede di forza elettromotrice indotta. Il programma FEMM prevede un'opzione per il calcolo automatico dell'integrale di superficie della componente A_z ; per la sua attivazione l'utente dovrà semplicemente selezionare la sezione sulla quale desidera integrare il potenziale vettore \dot{A} e cliccare sulla voce A presente nel menù a tendina contenente l'elenco delle grandezze integrabili.

Grazie a questa opzione è stato possibile stimare il valore del flusso concatenato Φ_c il quale è risultato pari a:

$$\Phi_c = -5.91 \cdot 10^{-8} \text{ [Wb]}$$

Energia e coenergia magnetica

L'energia magnetica, come precedentemente dimostrato, si può calcolare applicando la relazione (2.35), ovvero:

$$W_m = \int_0^\tau \int_0^B H dB d\tau$$

Nella quale τ rappresenta tutto il volume occupato dal modello progettato. Il codice FEMM consente l'attivazione dell'opzione per il calcolo automatico dell'energia magnetica semplicemente selezionando tutte le regioni definite e cliccando sulla voce “*Magnetic field energy*”. In questo caso, il valore ottenuto è risultato pari a:

$$W_m = 2.641 \cdot 10^{-1} \text{ [J]}$$

La coenergia magnetica si può invece stimare mediante la relazione (2.36), ovvero:

$$W_c = \int_0^\tau \int_0^H B dH d\tau$$

La quale, mediante la simulazione con codice FEMM, ha fornito il seguente valore:

$$W_c = 2.641 \cdot 10^{-1} \text{ [J]}$$

I valori di energia e coenergia magnetica ottenuti sono risultati uguali, questo è la dimostrazione del fatto che i materiali definiti nel modello lavorano in condizione di linearità magnetica.

Coppia

La coppia sviluppata sul rotore viene stimata dal software FEMM con buona precisione applicando il metodo del *tensore degli sforzi di Maxwell*. Questo metodo risulta estremamente efficace in tutti i casi in cui vi sia la necessità di stimare la coppia agente su un oggetto immerso in un campo elettromagnetico, in questo caso il rotore della microturbina progettata. Si consideri il volume τ occupato dal rotore della microturbina e si denoti con S una qualsiasi superficie chiusa tracciata lungo il traferro in aria che racchiuda il rotore. A titolo di esempio si faccia riferimento alla figura illustrativa riportata di seguito:

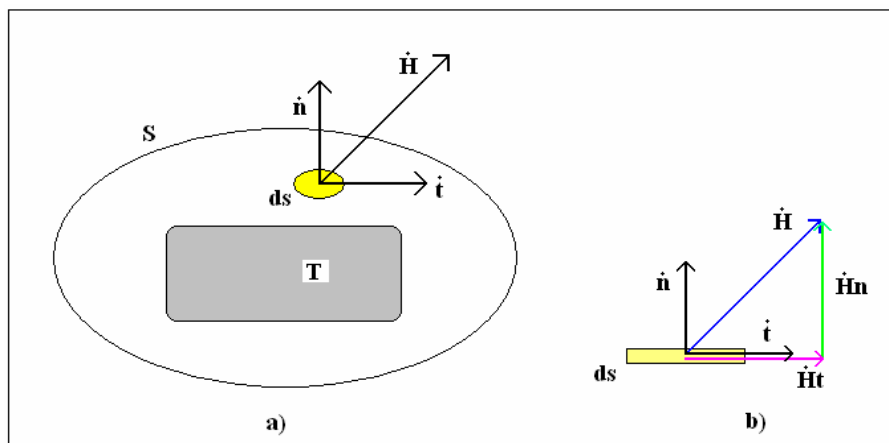


Fig. 2.14: Applicazione del metodo del tensore degli sforzi di Maxwell

Si consideri il volume τ occupato dal rotore della microturbina e si denoti con S una qualsiasi superficie chiusa tracciata lungo il traferro in aria che racchiuda il rotore. Grazie all'analisi eseguita dal software FEMM risulterà certamente noto il valore del campo magnetico \dot{H} in tutti i punti appartenenti alla superficie S ; si conosce inoltre la permeabilità magnetica μ_0 dell'aria che circonda il rotore. Si faccia ora riferimento ad una superficie infinitesima ds contenuta in S , la forza infinitesima $d\dot{F}$ che agisce su ds sarà pari a:

$$d\dot{F} = -\frac{\mu_0}{2}(\dot{H}^2 \cdot \dot{n})ds + \mu_0(\dot{H} \cdot \dot{n})\dot{H}ds$$

Nella quale \dot{n} rappresenta il versore normale all'areola infinitesima ds . Si esprima ora il campo magnetico \dot{H} nelle sue componenti tangenziale e normale a ds , ovvero:

$$\dot{H} = H_t \cdot \dot{t} + H_n \cdot \dot{n}$$

Introducendo tale equazione nell'espressione della forza infinitesima $d\dot{F}$ si ottiene:

$$d\dot{F} = (\mu_0 H_t H_n ds) \cdot \dot{t} + \frac{\mu_0}{2}(H_t^2 - H_n^2)ds \cdot \dot{n}$$

Nella quale si riconoscono le componenti tangenziale dF_t e normale dF_n della forza $d\dot{F}$, che saranno rispettivamente pari a:

$$dF_t = (\mu_0 H_t H_n)ds$$

$$dF_n = \frac{\mu_0}{2}(H_n^2 - H_t^2)ds$$

La forza infinitesima $d\dot{F}$, nota anche con il nome di tensore degli sforzi di Maxwell, sarà esprimibile come:

$$d\dot{F} = dF_t \cdot \dot{t} + dF_n \cdot \dot{n}$$

Il modulo del tensore degli sforzi di Maxwell risulterà pertanto pari a:

$$dF = \sqrt{dF_t^2 + dF_n^2}$$

La coppia infinitesima sviluppata rispetto al baricentro del rotore da parte della forza $d\dot{F}$ sarà pari a:

$$dT = (d\dot{F} \cdot \dot{v})r = dF_v r$$

Nella quale r rappresenta il braccio dell'areola ds rispetto al baricentro, mentre \dot{v} rappresenta il versore ad esso normale avente origine in ds (vedi Fig.2.15).

E' possibile considerare la forza infinitesima dF_v ortogonale ad r come prodotto tra la pressione p agente sull'areola ds stessa, ovvero:

$$dF_v = p \cdot ds$$

Con questa notazione la coppia infinitesima dT agente sull'areola ds risulterà pari a:

$$dT = p \cdot r \cdot ds$$

La coppia risultante agente sul rotore sarà infine pari all'integrale esteso su tutta la superficie S delle singole coppie infinitesime, ovvero:

$$T = \int_S p \cdot r \cdot ds \quad (2.44)$$

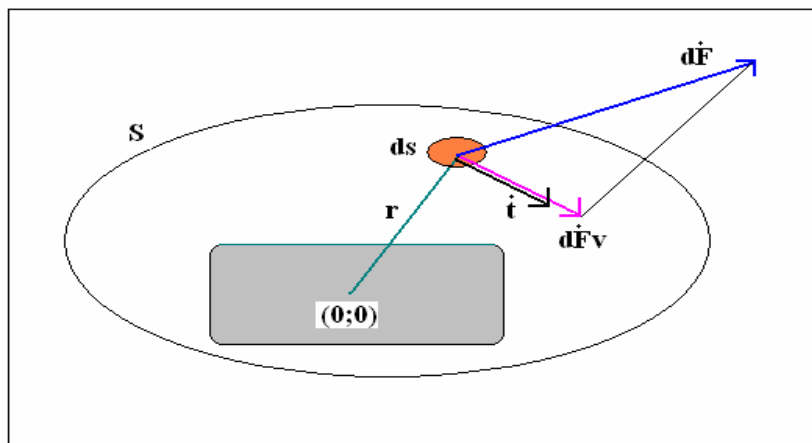


Fig. 2.15: Calcolo della coppia infinitesima (tensore degli sforzi di Maxwell)

Il software FEMM prevede un'opzione per il calcolo automatico della coppia agente su un oggetto circondato da aria ed immerso in un campo magnetico; per attivarla l'utente deve semplicemente selezionare la superficie occupata dall'oggetto e cliccare sulla voce "*Weighted stress tensor*".

Nel nostro caso il valore di coppia calcolato rispetto al baricentro del rotore stimato con il metodo del tensore degli sforzi di Maxwell è risultato pari a:

$$T = 0.161 \text{ [mNm]}$$

Il valore ottenuto è molto prossimo allo zero ed è esattamente quanto ci si attendeva, poichè nel funzionamento a vuoto manca il vettore densità di corrente \vec{J} che dia un significativo contributo al campo \vec{H} generato dai magneti permanenti dello statore.

Analisi ricorsiva mediante software LUA

La simulazione del modello progettato eseguita tramite software FEMM consente l'analisi del comportamento elettromagnetico della macchina partendo da una prefissata configurazione geometrica iniziale, non modificabile durante il processo di analisi. Per comprendere a pieno il comportamento del microgeneratore progettato è tuttavia indispensabile conoscere il valore delle principali grandezze elettromeccaniche (flusso concatenato, tensione indotta, corrente, coppia ecc..) al variare della posizione del rotore.

Ci si pone dunque come obiettivo la determinazione delle funzioni delle grandezze precedentemente citate al variare del parametro θ_m , il quale rappresenta l'angolo compreso tra l'asse del rotore e l'asse magnetico dell'avvolgimento di statore, ed il tracciamento dei relativi grafici.

Per far ciò è necessario eseguire un certo numero di simulazioni al variare della posizione (e quindi dell'angolo θ_m) del rotore, registrare di volta in volta i valori delle grandezze rilevate durante l'analisi in un file, calcolare e memorizzare le grandezze stimate indirettamente, ed infine rielaborare i risultati ottenuti per il tracciamento dei grafici.

Per impartire al software FEMM l'istruzione di eseguire una serie di simulazioni ricorsive per diverse posizioni del rotore si è dovuto scrivere uno script in codice LUA, in grado di gestire in automatico il processo di analisi e memorizzazione dei risultati. Il codice presentato nella pagina successiva è scritto direttamente nell'editor del software LUA, e successivamente mandato in esecuzione dalla finestra principale del FEMM selezionando la voce "*Open LUA script*".

Come si può notare esso è suddiviso a sua volta in due file, denominati rispettivamente "*PRE-LUA*" e "*POST-LUA*"; il primo contiene tutte le istruzioni da impartire al FEMM prima di avviare il processo di analisi mentre il secondo contiene tutte le istruzioni da impartire al programma chiamante una volta terminato il processo di simulazione.

PRE-LUA

```
-- INTRODUZIONE DEI DATI INIZIALI

p=1
n=3000    --[rpm]

-- INTRODUZIONE DEI DATI D'INGRESSO

thetamin=0
thetamax=180
step=4

handle=openfile("Modello1.txt","a")
write(handle,
        "thetam[rad]", " ",
        "corrente[A]", " ",
        "flusso[wb]", " ",
        "coppia[Nm]", " ",
        "energia[j]", " ",
        "coenergia[j]", " ",
        "\n")
closefile(handle)

-- VALORE EFFICACE DI CORRENTE NELLA BOBINA

J=8        --[A/mm2]
Scu1=72     --[mm2]
Ieff=J*Scu1 --[A]

-- VELOCITA' ANGOLARE  $\omega_m$ 

 $\omega_m = (2 \cdot 3.142 \cdot n) / 60$     -- [rad/s]

for thetam=thetamin,thetamax,step do

    Ib=-1.414*Ieff*cos(2*p*thetam)

    openfemmfile("modello1.fem")
    selectgroup(10)
    moverotate(0,0,thetam)
    clearselected()

    modifycircprop("Icu1",1,Ib)
    modifycircprop("Icu2",1,-Ib)

    savefemmfile("temp.fem")
    createmesh()
    analyse()

    thetarad=thetam*3.1416/180

    handle=openfile("Modello1.txt","a")
    write(handle,
          thetarad," ",
          Ib,"")
    closefile(handle)

    runpost("POSTModello1.lua")
end
```

POST-LUA

```
-- DICHIARAZIONE DI DATI AGGIUNTIVI

nc=2
LZ=0.01 --[mm]

-- CALCOLO DEL FLUSSO CONCATENATO

flusso=0

groupselectblock(1001)
Scu=blockintegral(5)
IntAz1=blockintegral(1)
clearblock()

groupselectblock(1002)
IntAz2=blockintegral(1)
clearblock()

flusso=nc*LZ*(IntAz1-IntAz2)/Scu

-- CALCOLO DELLA COPPIA AGENTE SUL ROTORE

groupselectblock(10)
coppia=blockintegral(22)
clearblock()

-- CALCOLO DI ENERGIA E COENERGIA MAGNETICA

groupselectblock()
energia=blockintegral(2)
coenergia=blockintegral(17)
clearblock()

-- SCRIVI I RISULTATI SUL FILE MODELLO1.txt

handle=openfile("Modello1.txt","a")
write(handle,
      flusso,"      ",
      coppia,"      ",
      energia,"      ",
      coenergia,"\n")
closefile(handle)

exitpost()
```


Elaborazione dei risultati

Grazie allo script realizzato in codice LUA è stato possibile ottenere i valori del flusso concatenato, della coppia agente sul rotore, dell' energia e della coenergia magnetica per diversi valori della posizione angolare del rotore. I risultati raccolti e memorizzati durante le varie simulazioni eseguite sul modello progettato vengono qui di seguito riportati:

Tabella 2.1: Risultati ottenuti dall' analisi a vuoto

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Tensione [V]	Coppia [Nm]	Energia [J]	Coenergia [J]
0	-5,91E-08	0,0259	0,0000	0,2640	0,2641
0,070	-1,30E-05	0,0256	-0,0165	0,2634	0,2635
0,140	-2,53E-05	0,0249	-0,0245	0,2619	0,2620
0,209	-3,61E-05	0,0236	-0,0231	0,2602	0,2603
0,279	-4,48E-05	0,0220	-0,0127	0,2588	0,2589
0,349	-5,10E-05	0,0198	-0,0024	0,2582	0,2584
0,419	-5,47E-05	0,0173	0,0009	0,2582	0,2585
0,489	-5,58E-05	0,0145	-0,0009	0,2582	0,2584
0,559	-5,41E-05	0,0113	-0,0070	0,2580	0,2583
0,628	-5,00E-05	0,0080	-0,0132	0,2573	0,2576
0,698	-4,42E-05	0,0045	-0,0163	0,2563	0,2565
0,768	-3,78E-05	0,0009	-0,0169	0,2551	0,2553
0,838	-3,14E-05	-0,0027	-0,0134	0,2541	0,2543
0,908	-2,57E-05	-0,0063	-0,0077	0,2533	0,2535
0,977	-2,08E-05	-0,0097	-0,0019	0,2530	0,2532
1,047	-1,69E-05	-0,0129	0,0027	0,2530	0,2532
1,117	-1,36E-05	-0,0159	0,0054	0,2533	0,2535
1,187	-1,09E-05	-0,0186	0,0066	0,2538	0,2540
1,257	-8,54E-06	-0,0209	0,0068	0,2542	0,2544
1,326	-6,42E-06	-0,0229	0,0061	0,2547	0,2550
1,396	-4,48E-06	-0,0243	0,0048	0,2550	0,2553
1,466	-2,64E-06	-0,0253	0,0030	0,2553	0,2555
1,536	-8,75E-07	-0,0258	0,0010	0,2554	0,2557
1,606	8,80E-07	-0,0258	-0,0010	0,2554	0,2557
1,676	2,64E-06	-0,0253	-0,0030	0,2553	0,2555
1,745	4,47E-06	-0,0243	-0,0048	0,2550	0,2552
1,815	6,41E-06	-0,0229	-0,0061	0,2546	0,2548
1,885	8,52E-06	-0,0209	-0,0068	0,2542	0,2544
1,955	1,10E-05	-0,0186	-0,0066	0,2538	0,2540
2,025	1,36E-05	-0,0159	-0,0054	0,2533	0,2535
2,094	1,69E-05	-0,0129	-0,0026	0,2531	0,2533
2,164	2,08E-05	-0,0097	0,0018	0,2530	0,2532
2,234	2,56E-05	-0,0063	0,0076	0,2533	0,2535
2,304	3,15E-05	-0,0027	0,0137	0,2541	0,2542
2,374	3,78E-05	0,0009	0,0169	0,2551	0,2553
2,443	4,42E-05	0,0045	0,0165	0,2563	0,2565
2,513	5,00E-05	0,0080	0,0129	0,2574	0,2576
2,583	5,40E-05	0,0113	0,0067	0,2580	0,2583
2,653	5,58E-05	0,0145	0,0007	0,2582	0,2584
2,723	5,47E-05	0,0173	-0,0017	0,2582	0,2584
2,793	5,10E-05	0,0198	0,0024	0,2582	0,2584
2,862	4,48E-05	0,0220	0,0123	0,2588	0,2589
2,932	3,61E-05	0,0236	0,0238	0,2601	0,2603
3,002	2,53E-05	0,0249	0,0247	0,2619	0,2620
3,072	1,30E-05	0,0256	0,0168	0,2634	0,2635
3,142	-5,91E-08	0,0259	-0,0002	0,2640	0,2641

Grafico del flusso concatenato

In virtù dei dati raccolti durante il processo di analisi è possibile tracciare il grafico del flusso concatenato con l'avvolgimento di statore al variare dell'angolo θ_m , che rappresenta la posizione angolare del rotore rispetto all'asse magnetico della bobina. Per la realizzazione del suddetto grafico sono stati rilevati i valori di flusso concatenato per 45 differenti valori dell'angolo meccanico θ_m :

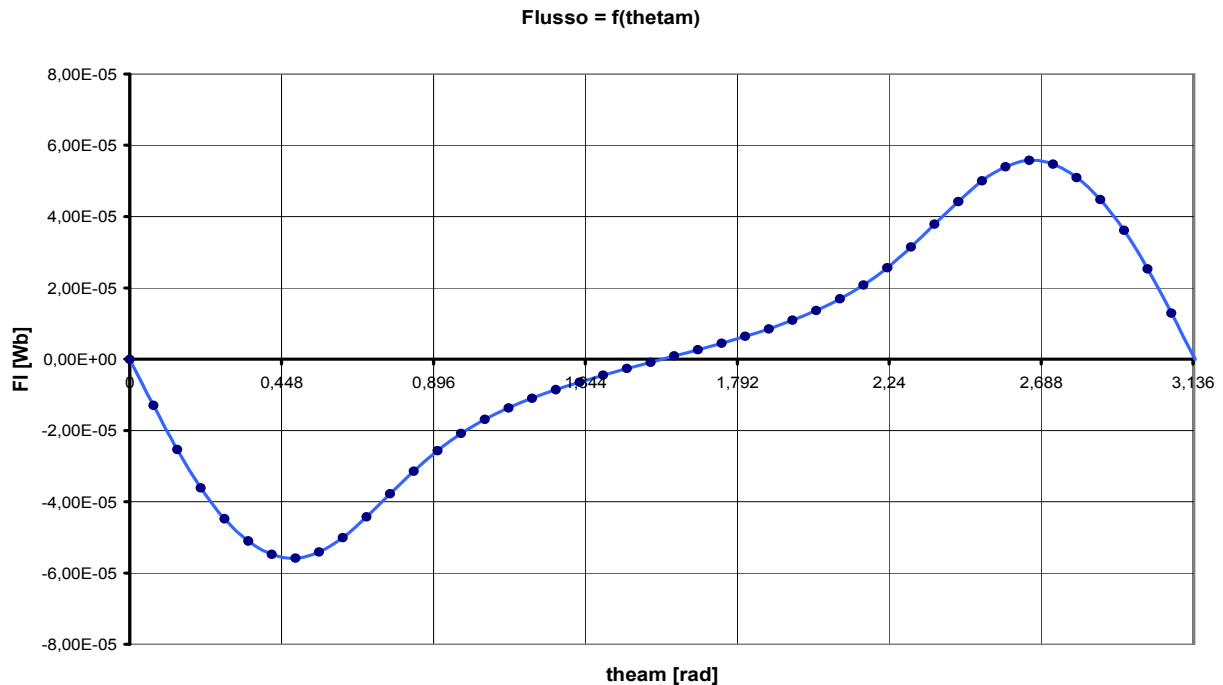


Fig. 2.16: Flusso concatenato in funzione dell'angolo θ_m

Grafico della coppia

Particolarmente interessante risulta l'andamento grafico della coppia in funzione della posizione angolare del rotore, qui di seguito riportato:

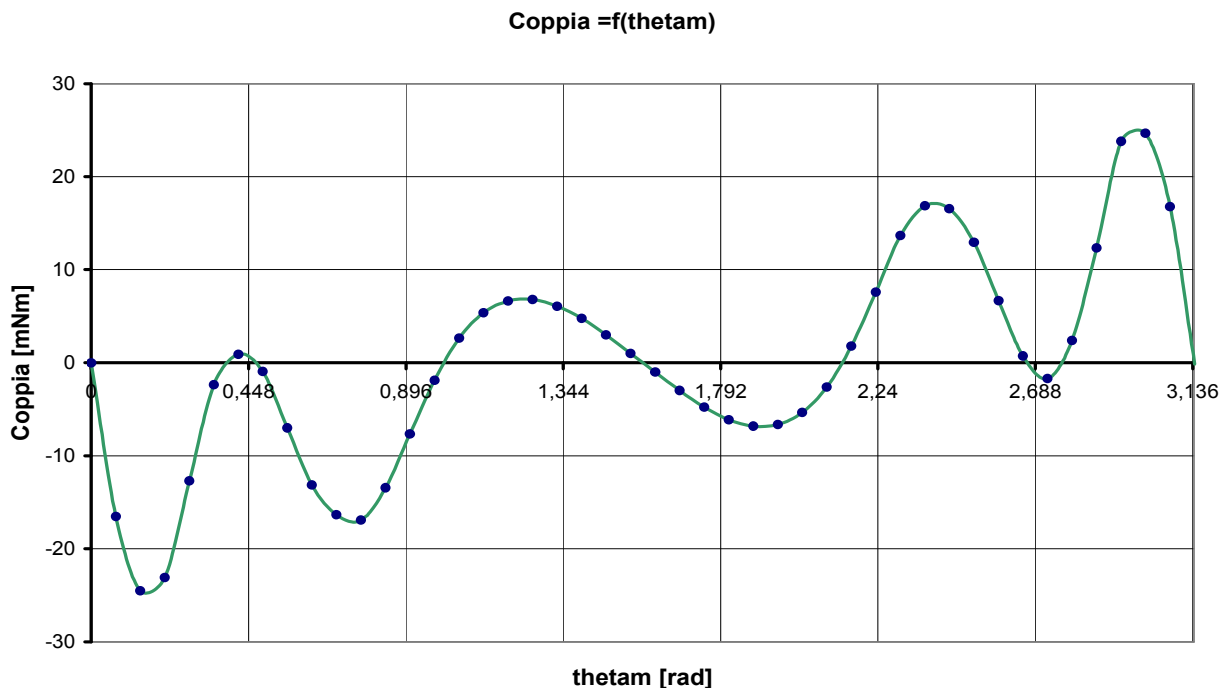


Fig. 2.17: Coppia sul rotore in funzione dell'angolo θ_m

Grafico dell' energia magnetica

Può risultare interessante riportare anche il grafico dell' energia magnetica al variare dell' angolo meccanico θ_m il quale, come si può vedere dalla figura sottostante, raggiunge il valore massimo per valori di θ_m pari a $k\pi$.

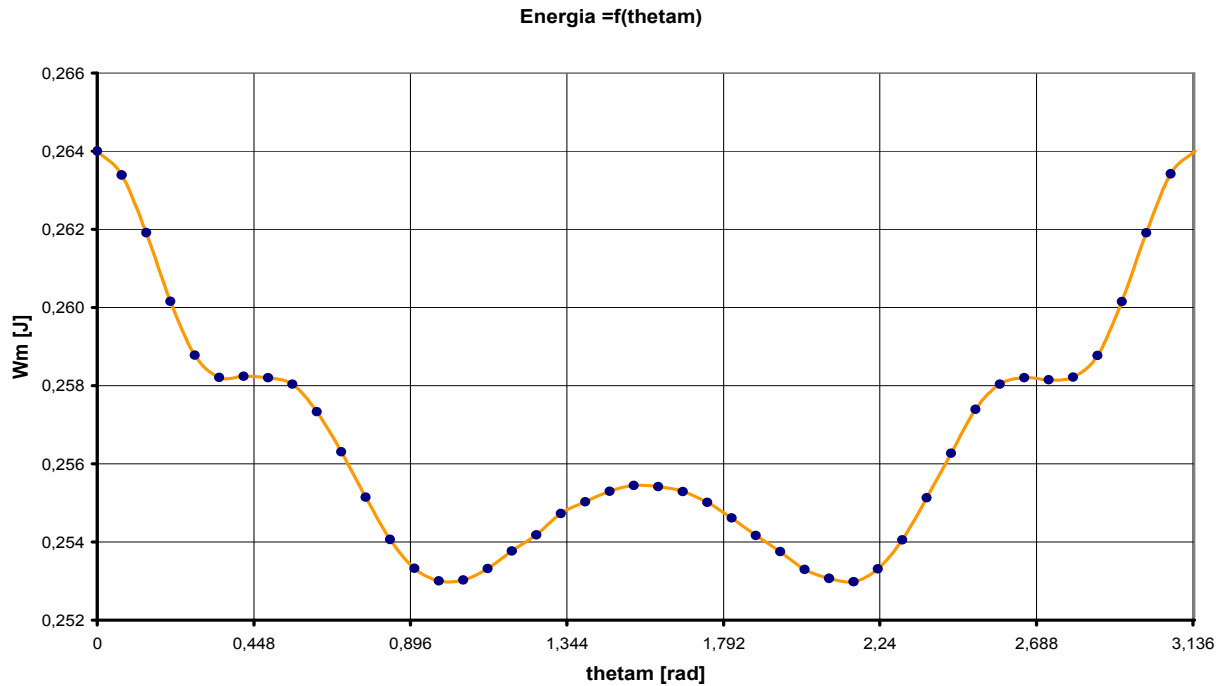


Fig. 2.18: Energia magnetica in funzione dell' angolo θ_m

Grafico della coenergia magnetica

Oltre che all' energia magnetica è interessante osservare anche il grafico della coenergia magnetica poichè, dal confronto dei due grafici, è possibile constatare se i materiali definiti nel modello lavorano in condizioni di linearità o meno:

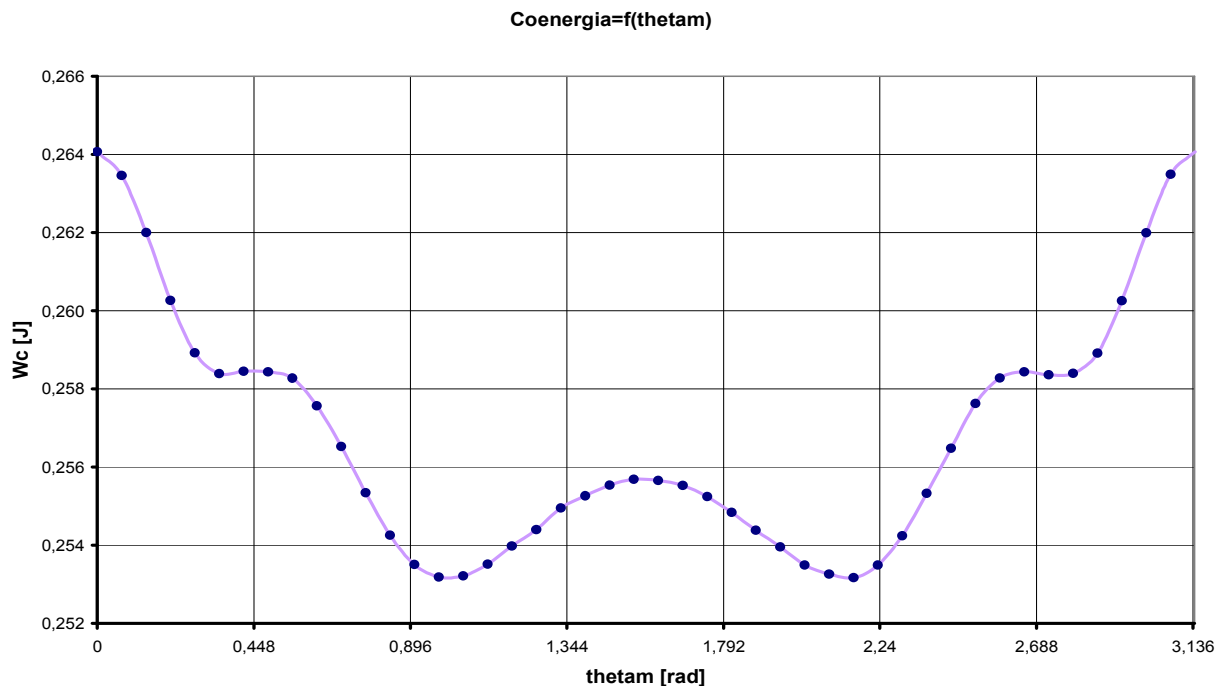


Fig. 2.19: Coenergia magnetica in funzione dell' angolo θ_m

Forza elettromotrice indotta

Il valore della tensione indotta nell' avvolgimento di statore si determina applicando la relazione (2.3), ossia calcolando la derivata temporale del flusso concatenato:

$$e(t) = -\frac{d\Phi_c(t)}{dt}$$

In questo caso la funzione $\Phi_c(t)$ è definita solamente per punti, poichè il flusso concatenato non presenta una forma d' onda associabile ad una funzione matematica nota. Per una stima approssimata del grafico della tensione indotta in funzione dell' angolo meccanico θ_m si è proceduto a scomporre in serie di Fourier la forma d' onda di $\Phi_c(t)$ ottenuta per punti, secondo la relazione (2.4) ossia:

$$\Phi_c(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)]$$

Per applicare la (2.4) calcolando i coefficienti delle armoniche e tracciarne le forme d' onda in funzione di θ_m è stato realizzato uno script in codice matlab, il quale viene riportato nella pagina successiva. Grazie ad esso è stato possibile determinare il valore efficace F_k e la fase ϕ_k delle principale armoniche che compongono il flusso concatenato $\Phi_c(t)$.

I coefficienti delle armoniche sono stati ottenuti implementando nello script le relazioni (2.6) e (2.7) precedentemente menzionate, mentre i corrispondenti valori efficaci e le corrispondenti fasi sono state ottenute implementando le equazioni (2.9) e (2.10). I risultati ottenuti sono stati raccolti nella sottostante tabella:

Tabella 2.2: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(t)$

ORDINE DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Fk [Wb]	øk [rad]
1	0	-4,12E-05	2,91E-02	-1,5706
2	0	-2,14E-05	1,51E-05	-1,5706
3	0	-4,51E-06	3,19E-06	1,5708
4	0	7,10E-07	5,00E-07	1,5624
5	0	3,60E-07	2,60E-07	1,5575

Una volta determinate le funzioni rappresentative delle principali armoniche del flusso concatenato è immediato ricavare il **valore efficace** F , il **fattore di distorsione** F_{dis} ed il **Total harmonic distortion** THD di $\Phi_c(t)$ applicando rispettivamente le seguenti equazioni:

$$F = \sqrt{F_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} F_k^2} \quad (2.45)$$

$$F_{dis} = \sqrt{F^2 - F_1^2} \quad (2.46)$$

$$THD = 100 \cdot \frac{F_{dis}}{F_1} \quad (2.47)$$

Le quali hanno fornito rispettivamente i seguenti risultati:

$$F = 3.301 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$F_{dis} = 1.552 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$THD = 53.21 \%$$

SCRIPT MATLAB: Scomposizione in serie di Fourier di $\Phi_c(t)$

% SVILUPPO IN SERIE DI FOURIER DEL FLUSSO CONCATENATO:

```
clc;
clear all;

% Acquisizione valori dell' angolo thetam:
dati1=importdata('Thetam.txt');
L=size(dati1,1);
thetam=dati1(1:L,1);

% Acquisizione valori del flusso concatenato:
dati2=importdata('Tensione.txt');
L=size(dati2,1);
flusso=dati2(1:L,1);

% Imposizione del numero delle armoniche:
Nar=5;

% Assegnazione del periodo e del passo:
T=2*pi;
N=length(thetam);
dz=T/(N-1);

for k=1:1:Nar
    b(k)=0;
    a(k)=0;
end

% Calcolo del valore medio del flusso:
Vm=0;
for n=1:1:N
    Vm=Vm+flusso(n)*dz;
end
Fo=Vm/T

% Calcolo dei coefficienti delle armoniche:
for k=1:1:Nar
    for n=1:1:N
        a(k)=a(k)+flusso(n)*cos(k*thetam(n))*dz;
        b(k)=b(k)+flusso(n)*sin(k*thetam(n))*dz;
    end
    b(k)=1/pi*b(k);
    a(k)=1/pi*a(k);
end

% Visualizza i valori dei coefficienti trovati
a b
```

```

% Valore efficace e fase delle armoniche:
for k=1:1:Nar
    Veff(k)=sqrt((a(k)^2+b(k)^2)/2);
    phase(k)=atan(-b(k)/a(k));
end

% Visualizza valori efficaci e fasi delle armoniche:
Veff
phase

% Valore efficace del flusso concatenato:
Fk=0;
for k=1:1:Nar
    Fk=Fk+(Veff(k))^2;
end
F=sqrt(Fo^2+Fk)

% Valore efficace della distorsione:
Fdis=sqrt(F^2-Veff(1)^2)

% Total Harmonic Distorsion:
THD=(Fdis/Veff(1))*100

% Costruzione delle armoniche:
for k=1:1:Nar
    for n=1:1:N
        Y(k,n)=a(k)*cos(k*thetam(n))+b(k)*sin(k*thetam(n));
    end
end

% Costruzione dei grafici:
plot(thetam,flusso)
grid,hold
plot(thetam,Fo)
plot(thetam,Y(1,:), 'm')
plot(thetam,Y(2,:), 'r')
plot(thetam,Y(3,:), 'g')
plot(thetam,Y(4,:), 'w')
plot(thetam,Y(5,:), 'k')

```

I risultati ottenuti dalla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(t)$ sono stati successivamente raccolti nella tabella sottostante, nella quale vengono riportati i valori efficaci delle armoniche principali:

Tabella 2.3: Scomposizione in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Y1 [Wb]	Y2 [Wb]	Y3 [Wb]	Y4 [Wb]	Y5 [Wb]
0	-5,91E-08	0	0	0	0	0
0,070	-1,30E-05	-5,73E-06	-5,90E-06	-1,83E-06	3,76E-07	2,31E-07
0,140	-2,53E-05	-1,13E-05	-1,13E-05	-3,35E-06	6,38E-07	3,55E-07
0,209	-3,61E-05	-1,67E-05	-1,59E-05	-4,29E-06	7,06E-07	3,12E-07
0,279	-4,48E-05	-2,18E-05	-1,92E-05	-4,49E-06	5,59E-07	1,23E-07
0,349	-5,10E-05	-2,65E-05	-2,11E-05	-3,91E-06	2,43E-07	-1,23E-07
0,419	-5,47E-05	-3,06E-05	-2,13E-05	-2,65E-06	-1,48E-07	-3,12E-07
0,489	-5,58E-05	-3,41E-05	-1,99E-05	-9,38E-07	-4,93E-07	-3,55E-07
0,559	-5,41E-05	-3,70E-05	-1,69E-05	9,38E-07	-6,89E-07	-2,31E-07
0,628	-5,00E-05	-3,91E-05	-1,26E-05	2,65E-06	-6,75E-07	-5,51E-12
0,698	-4,42E-05	-4,05E-05	-7,32E-06	3,91E-06	-4,56E-07	2,31E-07
0,768	-3,78E-05	-4,11E-05	-1,49E-06	4,49E-06	-9,88E-08	3,55E-07
0,838	-3,14E-05	-4,09E-05	4,45E-06	4,29E-06	2,89E-07	3,12E-07
0,908	-2,57E-05	-3,99E-05	1,01E-05	3,35E-06	5,89E-07	1,23E-07
0,977	-2,08E-05	-3,82E-05	1,49E-05	1,83E-06	7,10E-07	-1,23E-07
1,047	-1,69E-05	-3,56E-05	1,85E-05	6,90E-11	6,15E-07	-3,12E-07
1,117	-1,36E-05	-3,24E-05	2,08E-05	-1,83E-06	3,33E-07	-3,55E-07
1,187	-1,09E-05	-2,86E-05	2,14E-05	-3,35E-06	-4,95E-08	-2,31E-07
1,257	-8,54E-06	-2,42E-05	2,04E-05	-4,29E-06	-4,17E-07	-1,10E-11
1,326	-6,42E-06	-1,93E-05	1,77E-05	-4,49E-06	-6,58E-07	2,31E-07
1,396	-4,48E-06	-1,41E-05	1,38E-05	-3,91E-06	-6,99E-07	3,55E-07
1,466	-2,64E-06	-8,56E-06	8,71E-06	-2,65E-06	-5,28E-07	3,12E-07
1,536	-8,75E-07	-2,87E-06	2,98E-06	-9,38E-07	-1,96E-07	1,23E-07
1,606	8,80E-07	2,87E-06	-2,98E-06	9,38E-07	1,96E-07	-1,23E-07
1,676	2,64E-06	8,56E-06	-8,71E-06	2,65E-06	5,28E-07	-3,12E-07
1,745	4,47E-06	1,41E-05	-1,38E-05	3,91E-06	6,99E-07	-3,55E-07
1,815	6,41E-06	1,93E-05	-1,77E-05	4,49E-06	6,58E-07	-2,31E-07
1,885	8,52E-06	2,42E-05	-2,04E-05	4,29E-06	4,17E-07	-1,65E-11
1,955	1,10E-05	2,86E-05	-2,14E-05	3,35E-06	4,96E-08	2,31E-07
2,025	1,36E-05	3,24E-05	-2,08E-05	1,83E-06	-3,33E-07	3,55E-07
2,094	1,69E-05	3,56E-05	-1,85E-05	1,38E-10	-6,15E-07	3,12E-07
2,164	2,08E-05	3,82E-05	-1,49E-05	-1,83E-06	-7,10E-07	1,23E-07
2,234	2,56E-05	3,99E-05	-1,01E-05	-3,35E-06	-5,89E-07	-1,23E-07
2,304	3,15E-05	4,09E-05	-4,45E-06	-4,29E-06	-2,89E-07	-3,12E-07
2,374	3,78E-05	4,11E-05	1,49E-06	-4,49E-06	9,88E-08	-3,55E-07
2,443	4,42E-05	4,05E-05	7,32E-06	-3,91E-06	4,56E-07	-2,31E-07
2,513	5,00E-05	3,91E-05	1,26E-05	-2,65E-06	6,75E-07	-2,20E-11
2,583	5,40E-05	3,70E-05	1,69E-05	-9,38E-07	6,89E-07	2,31E-07
2,653	5,58E-05	3,41E-05	1,99E-05	9,38E-07	4,93E-07	3,55E-07
2,723	5,47E-05	3,06E-05	2,13E-05	2,65E-06	1,48E-07	3,12E-07
2,793	5,10E-05	2,65E-05	2,11E-05	3,91E-06	-2,43E-07	1,23E-07
2,862	4,48E-05	2,18E-05	1,92E-05	4,49E-06	-5,59E-07	-1,23E-07
2,932	3,61E-05	1,67E-05	1,59E-05	4,29E-06	-7,06E-07	-3,12E-07
3,002	2,53E-05	1,13E-05	1,13E-05	3,35E-06	-6,38E-07	-3,55E-07
3,072	1,30E-05	5,73E-06	5,90E-06	1,83E-06	-3,76E-07	-2,31E-07
3,142	-5,91E-08	6,30E-10	6,55E-10	2,07E-10	-4,35E-11	-2,76E-11

Grazie ai dati raccolti nella tabella (2.3) è stato possibile realizzare la rappresentazione grafica della serie di Fourier, nella quale si possono osservare i grafici delle prime cinque armoniche che compongono il flusso principale $\Phi_c(t)$; le armoniche di ordine superiore al quinto non sono state riportate poichè la loro ampiezza risultava prossima allo zero.

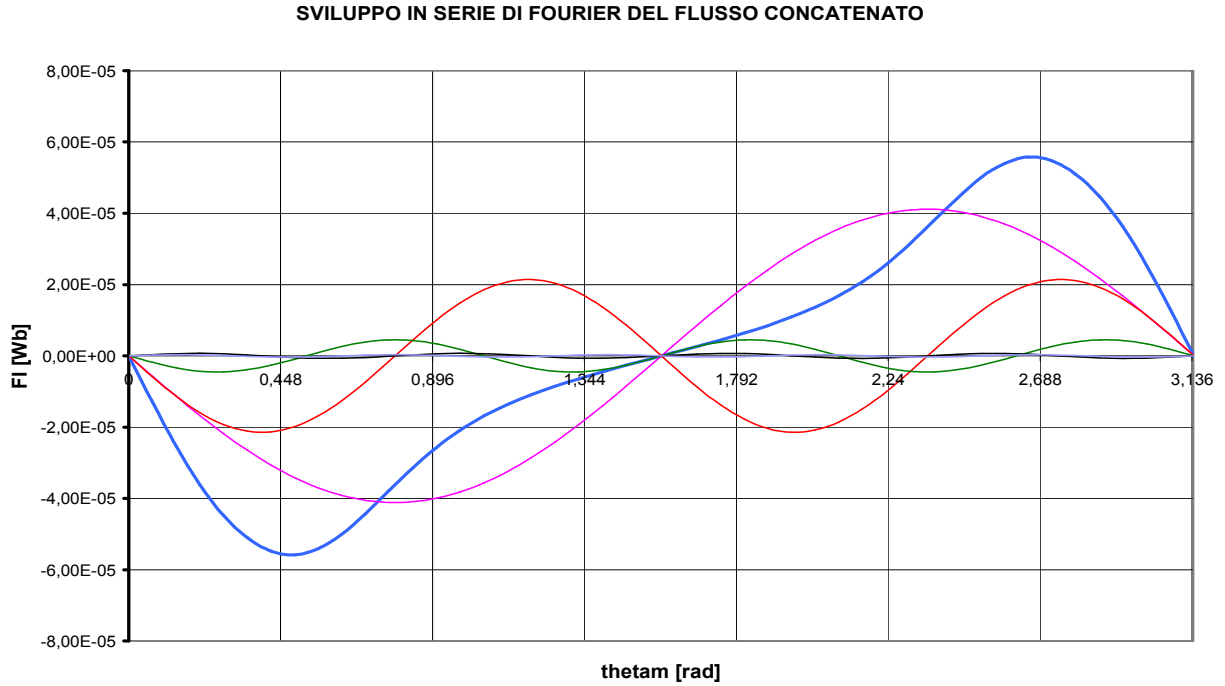


Fig. 2.20: Scomposizione in serie di fourier del flusso $\Phi_c(t)$

Grazie alla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(t)$ è possibile ricavare ampiezza e fase delle armoniche principali; in particolare risulta di notevole interesse la prima armonica (o armonica fondamentale) poichè grazie ad essa è possibile stimare la forma d' onda della tensione indotta nell' avvolgimento di statore. In virtù della (2.15) essa sarà esprimibile al variare della posizione angolare θ_m del rotore per mezzo della seguente funzione:

$$\lambda_1(\theta_m) = a_1 \cos(2p\theta_m) + b_1 \sin(2p\theta_m)$$

Approssimando il flusso concatenato con la sua prima armonica l' espressione della forza elettromotrice indotta può essere così stimata:

$$e(\theta_m) = \omega_m \frac{d\lambda_1(\theta_m)}{d\theta_m}$$

Ottenendo pertanto l' espressione finale:

$$e(\theta_m) = \omega_m \cdot 2p \cdot a_1 \sin(2p\theta_m) - \omega_m \cdot 2p \cdot b_1 \cos(2p\theta_m)$$

Il grafico della tensione indotta in funzione dell' angolo meccanico θ_m viene riportato nella pagina successiva in Fig.2.21, dal quale si nota chiaramente che essa risulta in quadratura rispetto al flusso $\Phi_c(t)$. Il valore massimo della forza elettromotrice indotta nella bobina ricavata dal grafico è risultata pari a:

$$E_{max} = 0.026 \text{ [V/spira]}$$

Il valore massimo della tensione indotta ottenibile tra i morsetti dell' avvolgimento di statore sarà invece pari al prodotto tra la tensione di spira ed il numero di spire della bobina, ovvero:

$$V_{max} = n_c \cdot E_{max} \text{ [V]}$$

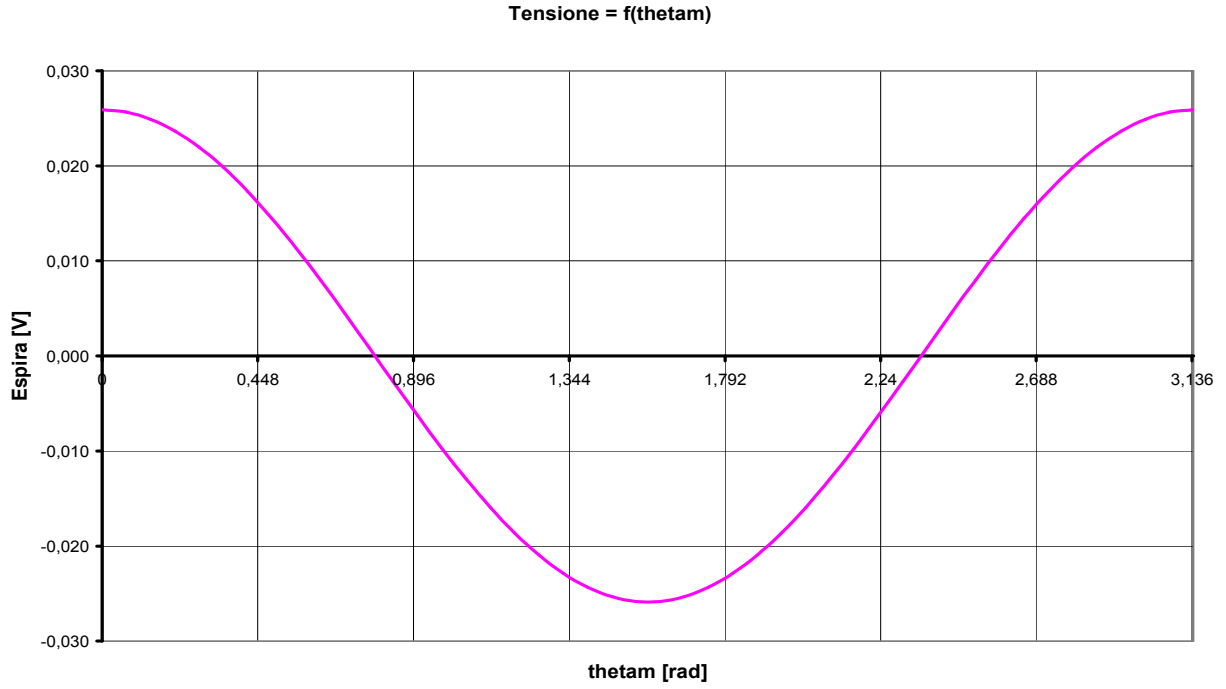


Fig. 2.21: Tensione indotta nell' avvolgimento di statore

Simulazioni al variare di θ_m

Per comprendere a pieno il comportamento del microgeneratore progettato quando funziona a vuoto sono state realizzate diverse simulazioni, riportando per ognuna di esse l' immagine che rappresenta il risultato dell' analisi del modello progettato per diverse posizioni del rotore (e quindi dell' angolo meccanico θ_m).

Le “fotografie” proposte sono di particolare interesse, in quanto consentono al lettore di comprendere immediatamente come si modifica la configurazione del campo di induzione magnetica \dot{B} durante la rotazione del rotore.

In particolare per questo primo modello sono state realizzate 19 immagini relativi ad altrettante posizioni del rotore; si è preferito soffermare l' attenzione per valori di θ_m non superiori a 180° , poichè per valori maggiori si ottengono immagini del tutto sovrapponibili alle precedenti.

È doveroso premettere che per tutte le immagini corrispondenti alle 19 differenti posizioni del rotore è stata mantenuta la stessa scala dei colori, nella quale il rosso appare nelle zone ad alta densità di campo di induzione magnetica ($|\dot{B}| > 1$ [T]) mentre il bianco ricopre le zone del modello caratterizzate da una densità di campo inferiori ai $9.7 \cdot 10^{-2}$ [T].

Per quanto riguarda la scelta dei valori da attribuire all' angolo meccanico θ_m dai quali dipendono le diverse posizioni del rotore, si è optato per un valore di passo pari a 10° , il quale è stato facilmente ricavato dall' applicazione della seguente formula empirica:

$$\theta_{step} = \frac{\theta_{max} - \theta_{min}}{N_i}$$

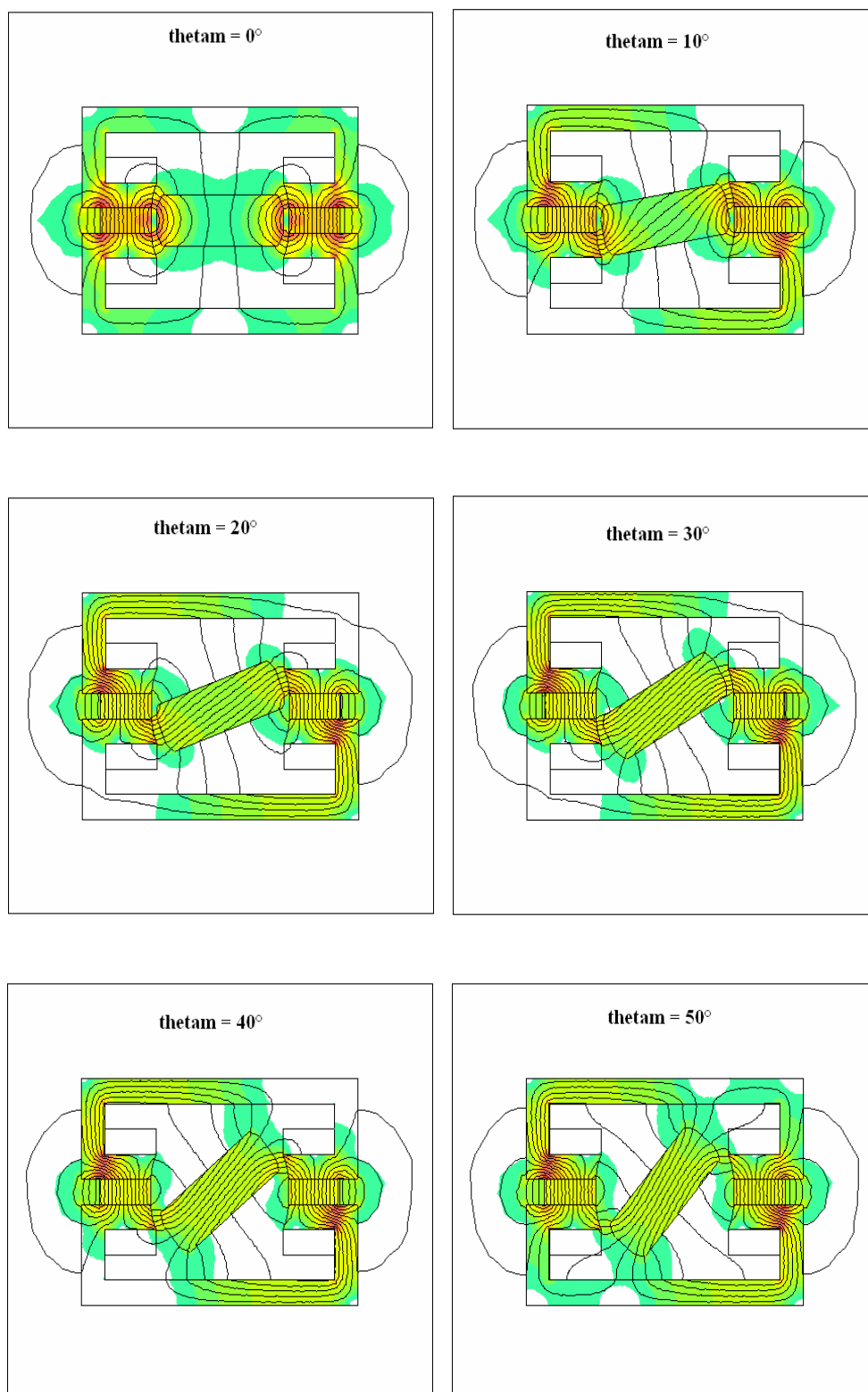
Nella quale θ_{min} rappresenta la posizione iniziale del rotore, θ_{max} rappresenta la posizione finale ed N_i sta ad indicare il numero di simulazioni da eseguire. Assegnando ai suddetti parametri i seguenti valori:

$$\theta_{min} = 0^\circ ; \theta_{max} = 180^\circ ; N_i = 18$$

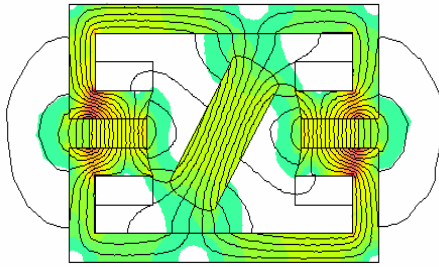
Si ottiene infatti un valore di passo angolare pari a:

$$\theta_{step} = \frac{180^\circ - 0^\circ}{18} = 10^\circ$$

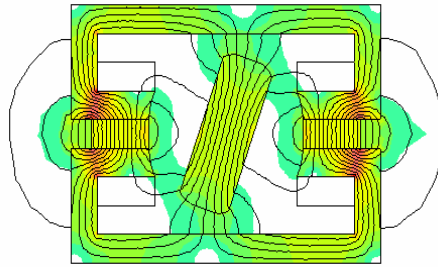
SIMULAZIONI A VUOTO AL VARIARE DI θ_m :



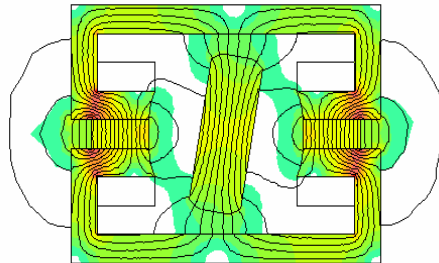
thetam = 60°



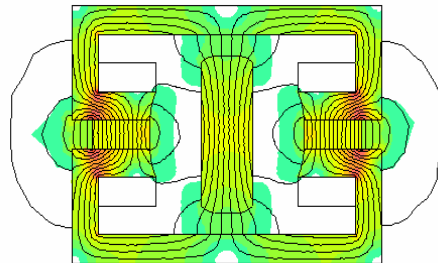
thetam = 70°



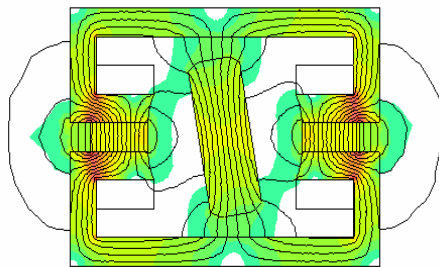
thetam = 80°



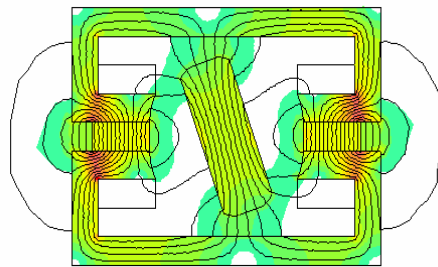
thetam = 90°



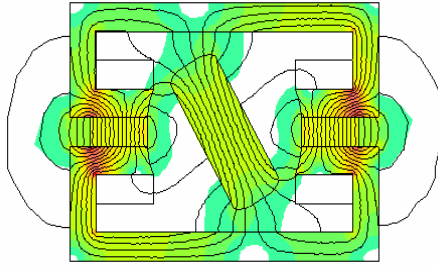
thetam = 100°



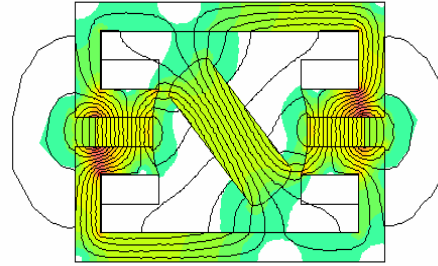
thetam = 110°



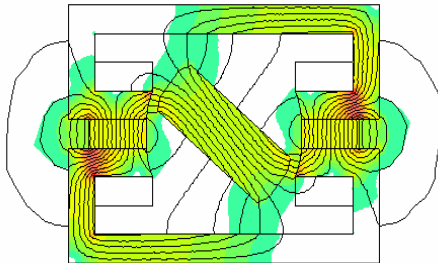
thetam = 120°



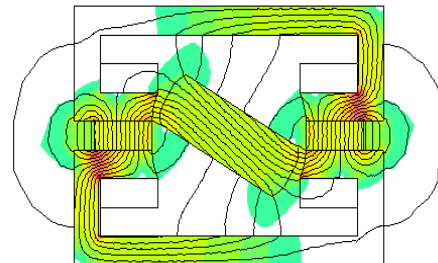
thetam = 130°



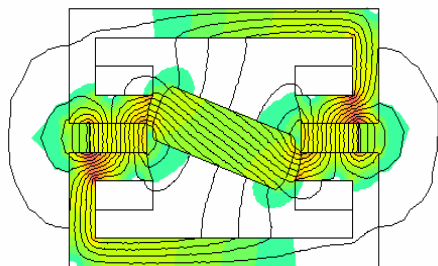
thetam = 140°



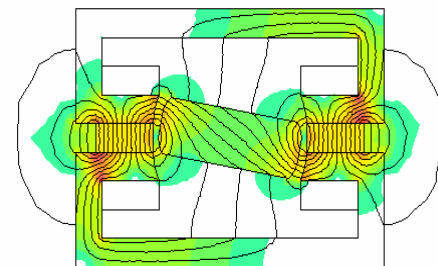
thetam = 150°

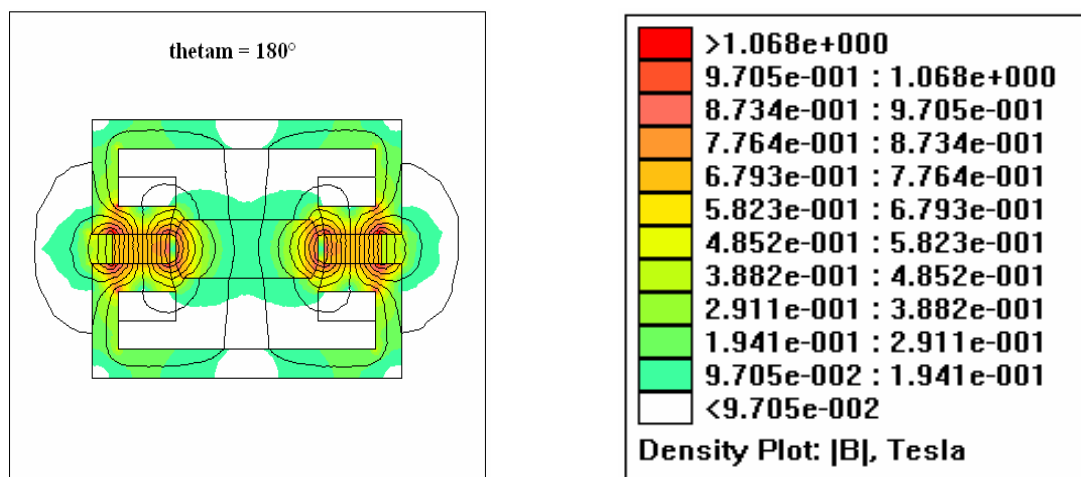


thetam = 160°



thetam = 170°





2.1.5 Simulazione del modello a carico

Nel caso in cui l'avvolgimento di statore sede di forza elettromotrice indotta venga connesso ad un carico (che per comodità si suppone puramente resistivo) si genera una corrente $i(\theta_m)$ che può essere espressa in funzione della posizione angolare del rotore mediante la seguente espressione:

$$i(\theta_m) = \frac{e(\theta_m)}{R}$$

Nella quale R rappresenta la resistenza del carico connesso alla bobina. Introducendo nella precedente equazione la relazione (2.16) che esprime la tensione indotta in funzione del parametro θ_m si ottiene una corrente espressa dalla seguente funzione:

$$i(\theta_m) = -\sqrt{2} \cdot I_b \cdot \cos(2p\theta_m) \quad (2.48)$$

La corrispondente forza magnetomotrice sarà data dal prodotto tra la corrente $i(\theta_m)$ ed il numero di spire n_c di cui è costituito l'avvolgimento di statore, ovvero:

$$m(\theta_m) = -\sqrt{2} \cdot n_c \cdot I_b \cdot \cos(2p\theta_m) \quad (2.49)$$

Ponendo per comodità $\sqrt{2} \cdot n_c \cdot I_b = M$ è possibile esprimere la forza magnetomotrice messa in gioco in forma compatta, ovvero:

$$m(\theta_m) = -M \cos(2p\theta_m) \quad (2.50)$$

Al fine di analizzare il comportamento a carico del modello di microturbina progettato è stato assegnato alla forza magnetomotrice messa in gioco il seguente valore massimo:

$$M = 815 \text{ [A]}$$

Per determinare la distribuzione del campo di induzione magnetica $|\vec{B}|$ e la conformazione delle linee di flusso nel modello funzionante a carico è stata eseguita la simulazione mediante software FEMM; il risultato dell'analisi viene qui di seguito riportato:

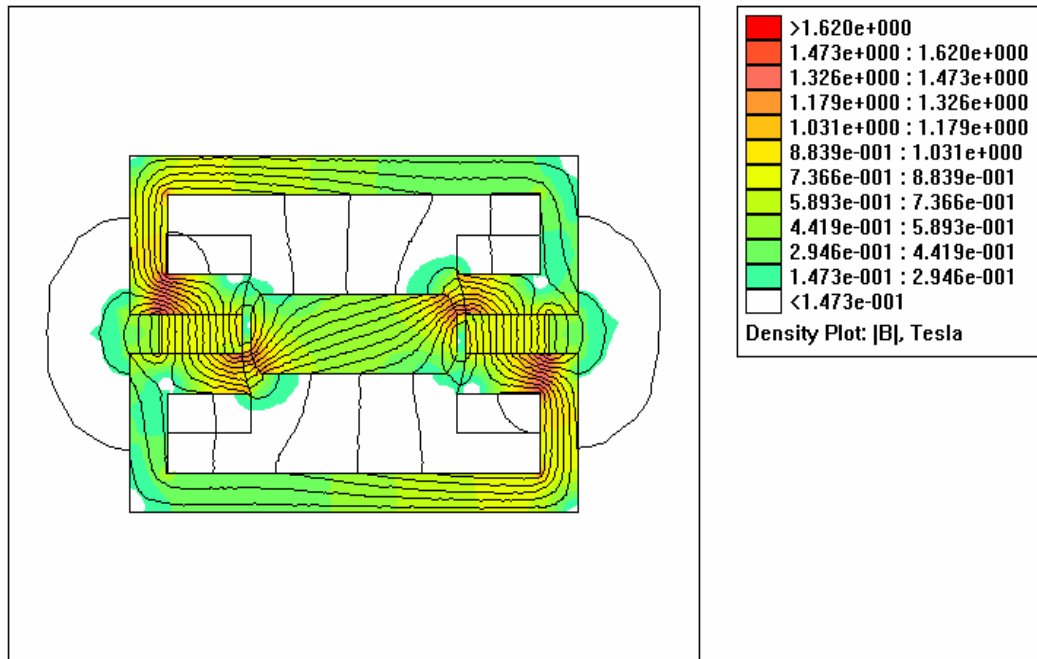


Fig. 2.22: Simulazione a carico del primo modello di microturbina

Confrontando la simulazione sopra riportata con la simulazione precedentemente eseguita e illustrata in Fig.2.10 si nota come nel passaggio da vuoto a carico le linee di flusso del campo $|\dot{B}|$ vengano notevolmente distorte, a causa del flusso magnetico creato dalla corrente $i(t)$ che si sovrappone al flusso magnetico principale creato dai magneti permanenti di statore.

Si nota inoltre che nel funzionamento a carico il modulo del campo di induzione magnetica $|\dot{B}|$ raggiunge valori più elevati rispetto al funzionamento a vuoto, in particolare nelle zone caratterizzate dalla massima densità di campo è stata riscontrata la seguente differenza:

$$|\dot{B}| = 1.077 \text{ [T]} \text{ -FUNZIONAMENTO A VUOTO}$$

$$|\dot{B}| = 1.620 \text{ [T]} \text{ -FUNZIONAMENTO A CARICO}$$

È pertanto evidente che nel funzionamento a carico il circuito ferromagnetico risulterà magneticamente più caricato rispetto al funzionamento a vuoto, nel quale è presente solamente il flusso magnetico principale creato dai magneti.

Si procede ora all'analisi del modulo dei campi $|\dot{B}|$ ed $|\dot{H}|$ e della componente A_z del potenziale vettore magnetico al traferro, esattamente come è stato fatto nell'analisi del modello funzionante a vuoto.

Potenziale vettore magnetico

Si riporta qui di seguito l'andamento del potenziale vettore magnetico A_z lungo il traferro, al fine di effettuarne un confronto con il corrispondente grafico ottenuto nel funzionamento a carico:

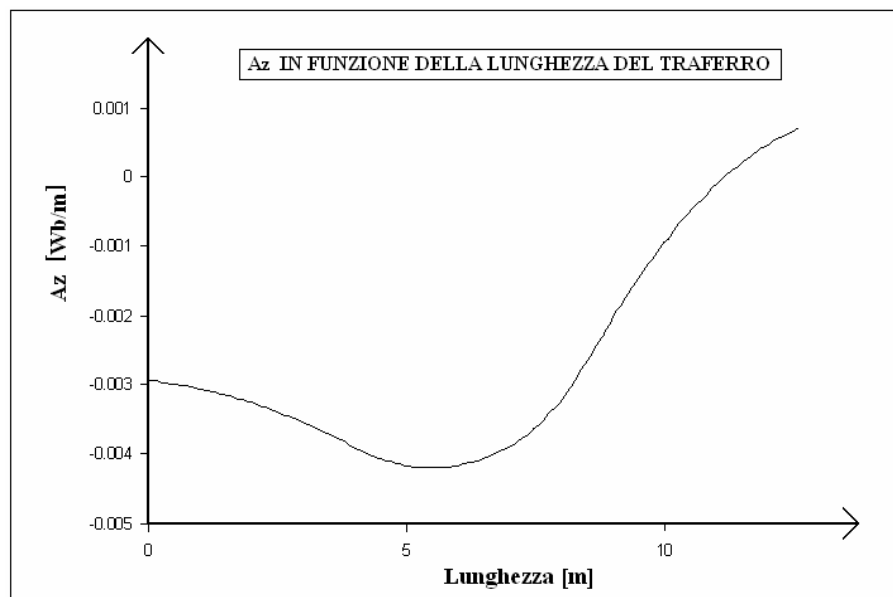


Fig. 2.23: Componente A_z del potenziale vettore magnetico al traferro (a carico)

Dal confronto delle due curve ottenute in Fig.2.11 ed in Fig.2.23 emerge che nel funzionamento a carico il potenziale vettore magnetico A_z assume valori più elevati rispetto al funzionamento a vuoto, questo era prevedibile perché il circuito magnetico è più caricato.

Oltre che assumere valori maggiori, la forma d'onda del potenziale A_z appare distorta, questo a causa dell'effetto "distorcente" della corrente di carico che altera la configurazione del flusso principale.

Si può inoltre notare che il valore minimo del potenziale vettore magnetico si ottiene circa in corrispondenza dell'asse magnetico dell'avvolgimento di statore, questo sia nel funzionamento a carico sia nel funzionamento a vuoto del modello di microgeneratore progettato.

Campo di induzione magnetica

Riportiamo qui di seguito l'andamento del modulo del campo di induzione magnetica $|\dot{B}|$ al variare della lunghezza del traferro:

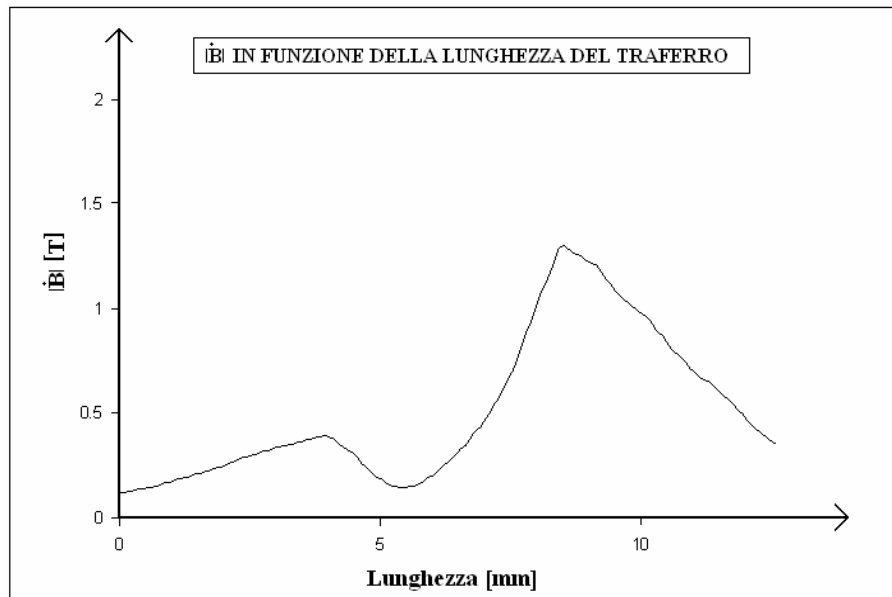


Fig. 2.24: $|\dot{B}|$ in funzione della lunghezza del traferro

Osservando la Fig.2.24 si nota che il modulo del campo di induzione magnetica $|\dot{B}|$ assume valori più elevati rispetto al funzionamento a vuoto, grazie al contributo dato dal flusso prodotto dalla corrente che percorre l'avvolgimento di statore. La forma d'onda di $|\dot{B}|$ appare inoltre distorta rispetto alla Fig.2.12 poichè il flusso magnetico principale prodotto dai magneti ed il flusso indotto risultano tra loro in quadratura.

Campo magnetico

Viene qui di seguito riportato l'andamento del modulo del campo magnetico $|\dot{H}|$ in funzione della lunghezza del traferro:

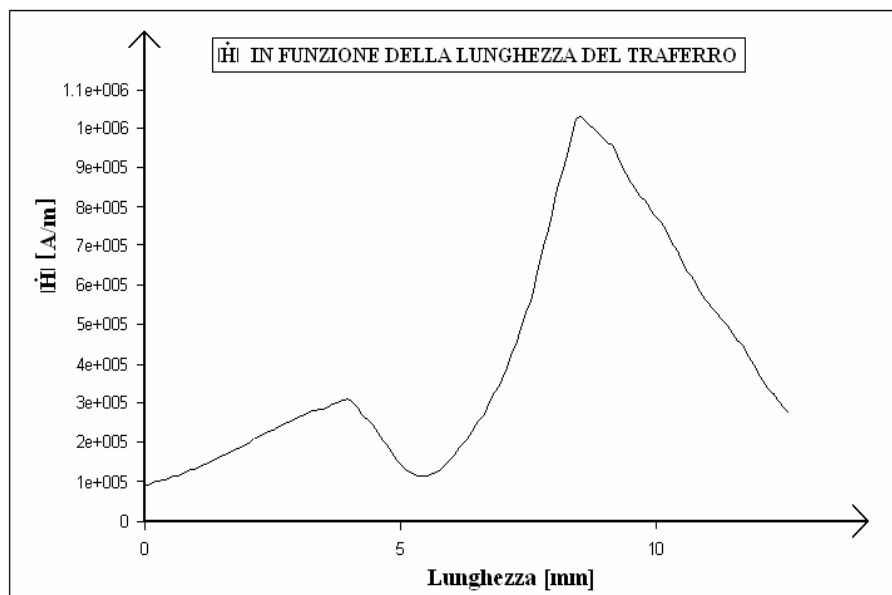


Fig. 2.25: $|\dot{H}|$ in funzione della lunghezza del traferro

Flusso concatenato

Il valore del flusso concatenato con l' avvolgimento di statore ottenuto dalla simulazione del modello mediante codice FEMM è risultato pari al seguente valore:

$$\Phi_c(t) = -9.018 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

Valore ben più alto del flusso concatenato ottenuto dalla simulazione del modello a vuoto.

Energia e coenergia magnetica

Dalla simulazione del modello a carico sono stati rilevati, rispettivamente per l' energia e la coenergia magnetica, i seguenti valori:

$$W_m = 0.282 \text{ [J]}$$

$$W_c = 0.282 \text{ [J]}$$

Entrambi i valori ottenuti risultano più elevati rispetto ai corrispondenti valori ottenuti dall' analisi a vuoto.

Coppia

La coppia agente sul rotore ottenuta dalla simulazione con codice FEMM mediante l' applicazione del tensore degli sforzi di Maxwell è risultata pari al seguente valore:

$$T = 0.077 \text{ [Nm]}$$

Valore ben più elevato rispetto alla coppia ottenuta dalla simulazione del modello a vuoto, questo grazie alla presenza del campo densità di corrente \vec{J} che aumenta notevolmente il campo magnetico \vec{H} .

Analisi ricorsiva mediante script LUA

Analogamente a quanto fatto per l' analisi del modello progettato funzionante a vuoto, ci si pone ora l' obiettivo di tracciare i grafici relativi alle principali grandezze elettromeccaniche al variare dell' angolo meccanico θ_m corrispondente alla posizione angolare del rotore.

In particolare si desidera tracciare i grafici del flusso concatenato, della corrente nella bobina, della coppia agente sul rotore, dell' energia e della coenergia magnetica per eseguire un confronto con quelli ottenuti dall' analisi a vuoto.

Per ottenere i valori delle suddette grandezze in funzione di θ_m ci si è serviti dello stesso script realizzato in codice LUA precedentemente utilizzato nel processo di simulazione a vuoto del modello. I risultati ottenuti vengono memorizzati in automatico in un file di testo, al fine di consentire all' utente una rapida ed agevole rielaborazione atta a consentire il tracciamento delle forme d' onda delle grandezze d' interesse.

In particolare i dati ottenuti dall' analisi a carico sono stati salvati in un foglio di lavoro elettronico di formato *Excel* e sempre nello stesso ambiente sono stati tracciati i diagrammi delle principali grandezze elettromeccaniche in funzione del parametro θ_m .

Al fine di ottenere i valori della forza elettromotrice indotta nell' avvolgimento di statore si è proceduto alla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato individuando ampiezza e fase della prima armonica, la cui determinazione è essenziale al fine di stimare la forma d' onda della tensione indotta $e(\theta_m)$.

A questo scopo ci si è serviti del medesimo script realizzato in codice MATLAB con il quale è stata eseguito lo sviluppo in serie di Fourier del flusso concatenato presente nel modello funzionante a vuoto. I dati ottenuti e le forme d' onda delle grandezze tracciate in funzione del parametro θ_m sono riportati nelle pagine successive.

Tabella 2.4: Risultati ottenuti dall' analisi a carico

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Tensione [V]	Fmm [A]	Coppia [Nm]	Energia [J]	Coenergia [J]
0	-9,02E-05	0,0258	-814,464	0,0770	0,2819	0,2825
0,070	-1,007E-04	0,0201	-806,538	0,0501	0,2857	0,2865
0,140	-1,074E-04	0,0141	-782,913	0,0303	0,2871	0,2881
0,209	-1,102E-04	0,0078	-744,050	0,0183	0,2865	0,2876
0,279	-1,100E-04	0,0014	-690,705	0,0157	0,2845	0,2857
0,349	-1,071E-04	-0,0051	-623,916	0,0149	0,2820	0,2831
0,419	-1,015E-04	-0,0115	-544,983	0,0057	0,2788	0,2798
0,489	-9,291E-05	-0,0176	-455,442	-0,0059	0,2746	0,2754
0,559	-8,160E-05	-0,0234	-357,038	-0,0172	0,2698	0,2704
0,628	-6,819E-05	-0,0288	-251,683	-0,0234	0,2646	0,2650
0,698	-5,370E-05	-0,0336	-141,430	-0,0228	0,2597	0,2600
0,768	-3,954E-05	-0,0377	-28,424	-0,0183	0,2557	0,2559
0,838	-2,656E-05	-0,0411	85,135	-0,0098	0,2529	0,2530
0,908	-1,521E-05	-0,0437	197,037	-0,0006	0,2513	0,2515
0,977	-5,630E-06	-0,0455	305,104	0,0067	0,2510	0,2512
1,047	2,358E-06	-0,0463	407,232	0,0117	0,2516	0,2517
1,117	9,089E-06	-0,0463	501,434	0,0145	0,2528	0,2529
1,187	1,481E-05	-0,0454	585,876	0,0157	0,2543	0,2545
1,257	1,969E-05	-0,0436	658,915	0,0159	0,2560	0,2562
1,326	2,385E-05	-0,0409	719,129	0,0153	0,2578	0,2581
1,396	2,732E-05	-0,0374	765,346	0,0142	0,2593	0,2596
1,466	3,017E-05	-0,0332	796,666	0,0127	0,2607	0,2610
1,536	3,245E-05	-0,0284	812,480	0,0110	0,2617	0,2621
1,606	3,420E-05	-0,0230	812,480	0,0094	0,2624	0,2628
1,676	3,543E-05	-0,0172	796,666	0,0078	0,2627	0,2631
1,745	3,624E-05	-0,0110	765,346	0,0064	0,2626	0,2630
1,815	3,663E-05	-0,0046	719,129	0,0055	0,2622	0,2626
1,885	3,671E-05	0,0019	658,915	0,0051	0,2614	0,2618
1,955	3,666E-05	0,0083	585,876	0,0055	0,2606	0,2609
2,025	3,635E-05	0,0146	501,434	0,0068	0,2594	0,2598
2,094	3,615E-05	0,0206	407,232	0,0091	0,2584	0,2587
2,164	3,597E-05	0,0262	305,104	0,0123	0,2572	0,2575
2,234	3,607E-05	0,0313	197,037	0,0157	0,2563	0,2565
2,304	3,636E-05	0,0357	85,135	0,0176	0,2555	0,2557
2,374	3,608E-05	0,0395	-28,424	0,0155	0,2546	0,2548
2,443	3,473E-05	0,0425	-141,430	0,0107	0,2535	0,2537
2,513	3,178E-05	0,0447	-251,683	0,0051	0,2523	0,2525
2,583	2,626E-05	0,0460	-357,038	0,0011	0,2510	0,2511
2,653	1,816E-05	0,0464	-455,442	0,0027	0,2499	0,2500
2,723	7,270E-06	0,0460	-544,983	0,0128	0,2498	0,2499
2,793	-6,056E-06	0,0446	-623,916	0,0320	0,2513	0,2514
2,862	-2,158E-05	0,0423	-690,705	0,0578	0,2548	0,2549
2,932	-3,911E-05	0,0393	-744,050	0,0859	0,2607	0,2608
3,002	-5,766E-05	0,0354	-782,913	0,0999	0,2681	0,2683
3,072	-7,539E-05	0,0309	-806,538	0,0963	0,2757	0,2761
3,142	-9,018E-05	0,0258	-814,464	0,0770	0,2819	0,2825

Grafico del flusso concatenato

Si riporta qui di seguito la forma d'onda del flusso concatenato ottenuta per diversi valori dell'angolo meccanico θ_m . Nel funzionamento a carico è costituito dalla sovrapposizione tra il flusso principale generato dai magneti permanenti di statore ed il flusso generato dalla corrente circolante nell'avvolgimento.

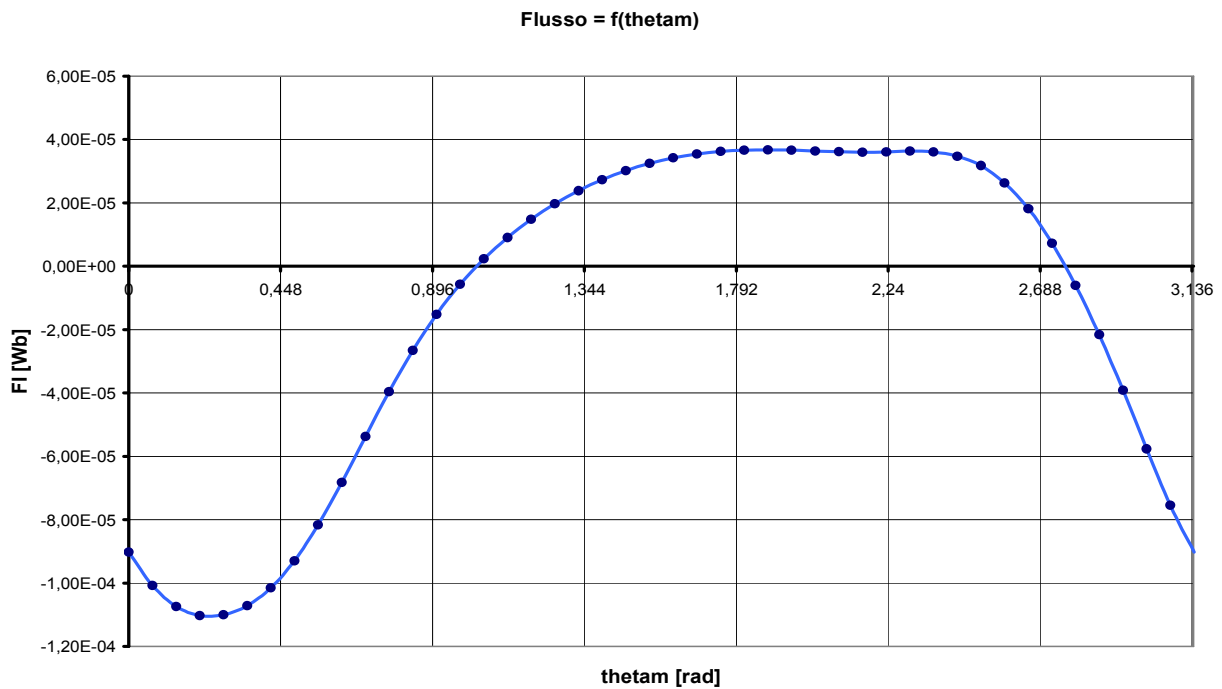


Fig. 2.26: Flusso concatenato in funzione di θ_m (modello a carico)

Grafico della forza magnetomotrice

Al fine dello studio del comportamento a carico del modello progettato è stata imposta una forza magnetomotrice espressa dalla (2.50), nella quale si è posto un valore massimo pari a 815 [A]. Il grafico della forza magnetomotrice al variare dell'angolo meccanico θ_m appare come qui sotto riportata:

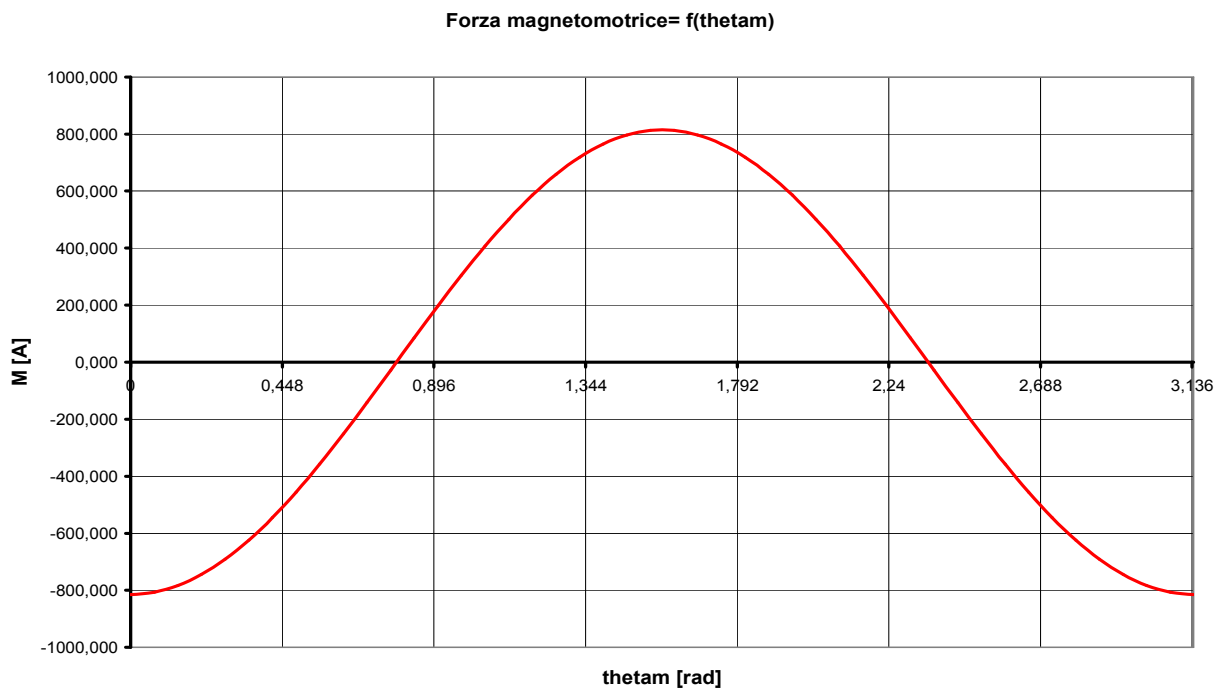


Fig. 2.27: Forza magnetomotrice in funzione di θ_m

Coppia

La coppia che agisce sul rotore con questa configurazione di campo elettromagnetico in funzione di θ_m viene qui di seguito riportata:

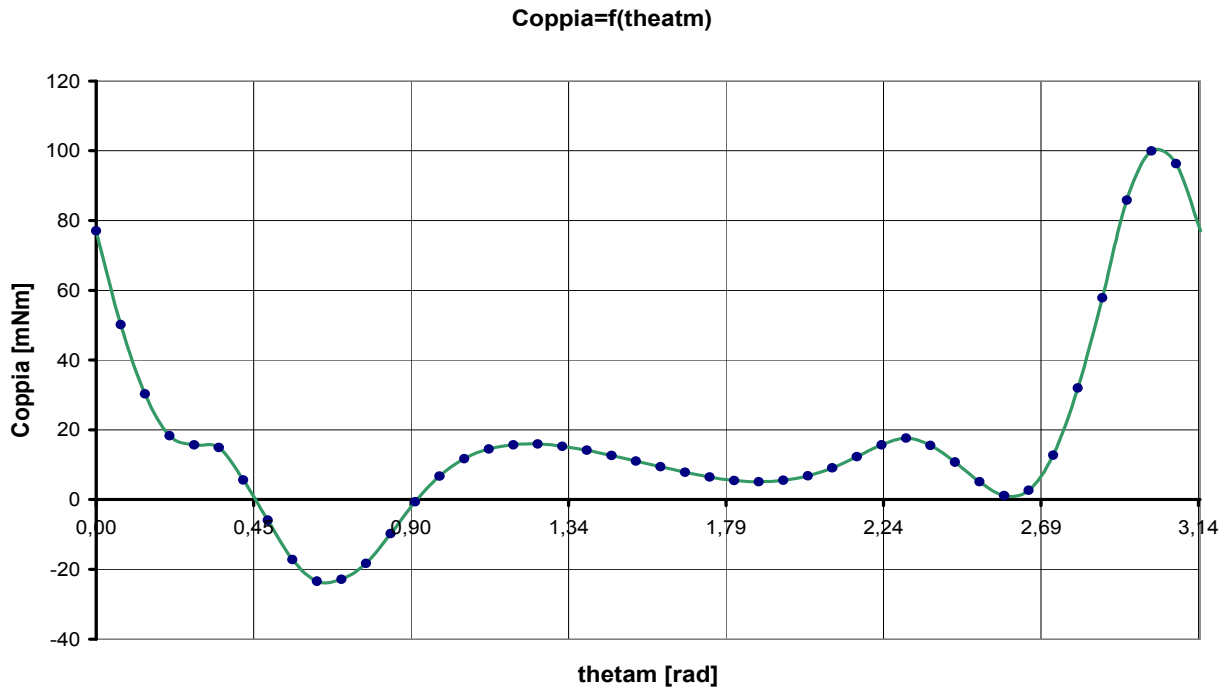


Fig. 2.28: Coppia sul rotore in funzione di θ_m

Energia magnetica

Si riporta qui sotto la forma d'onda dell' energia magnetica in funzione di θ_m ottenuta durante la simulazione del modello a carico eseguita con il software FEMM:

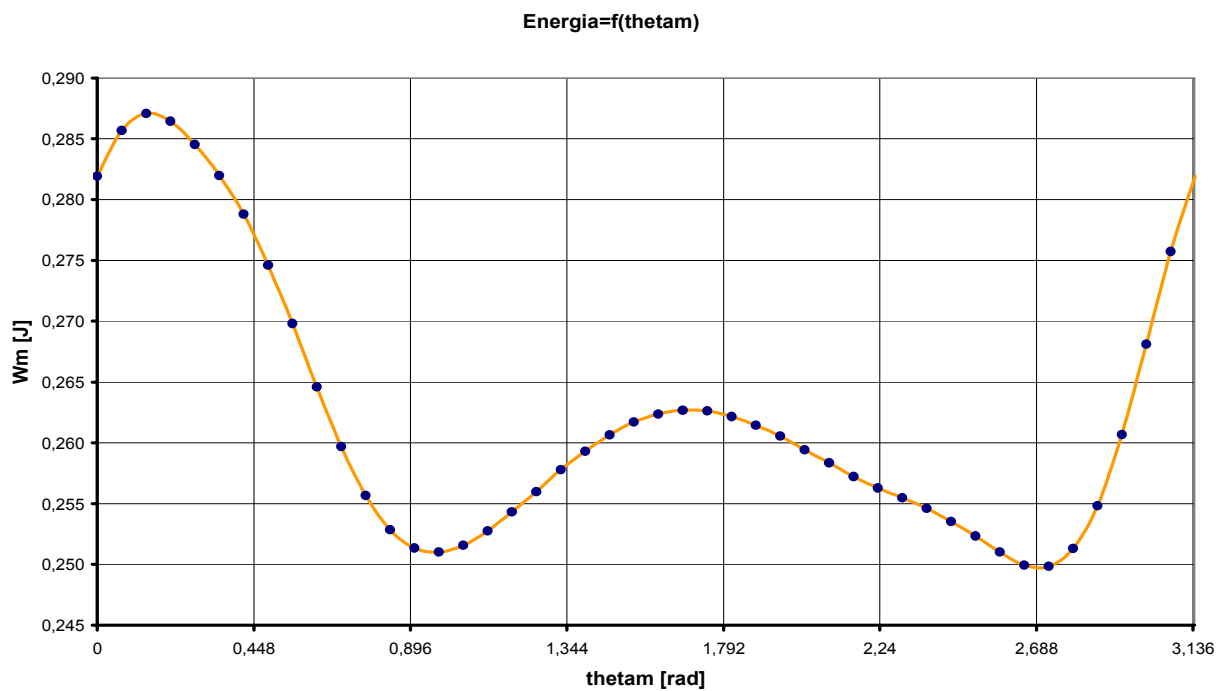


Fig. 2.29: Energia magnetica in funzione di θ_m

Coenergia magnetica

Analogamente a quanto fatto per l'energia magnetica è possibile tracciare la forma d'onda della coenergia magnetica in funzione della posizione del rotore rappresentata dall'angolo θ_m ; entrambe vengono calcolate considerando tutto il volume occupato dal modello progettato.

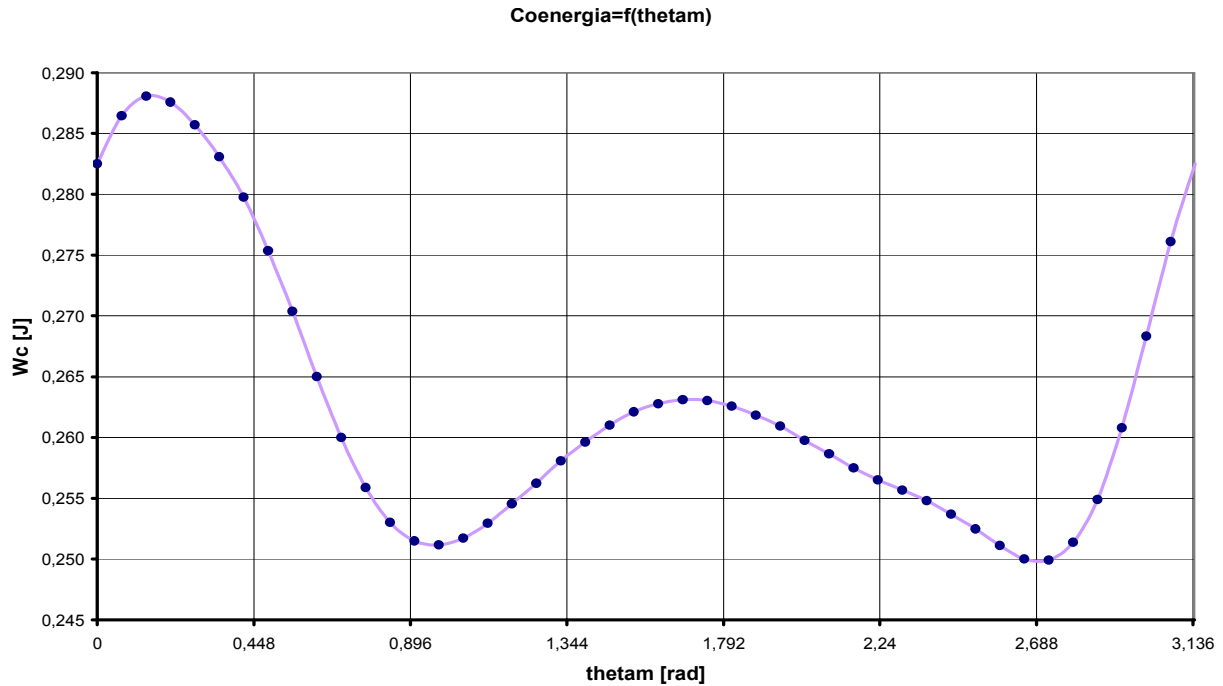


Fig. 2.30: Coenergia magnetica in funzione di θ_m

Forza elettromotrice indotta

Per ottenere i valori della tensione indotta $e(\theta_m)$ è necessario eseguire la scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ al fine di determinare l'armonica fondamentale. Implementando lo script realizzato in codice MATLAB precedentemente descritto è stato possibile ottenere valore efficace e fase delle armoniche principali che compongono il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ a carico. I risultati ottenuti sono stati raccolti nella seguente tabella:

Tabella 2.5: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ a carico

ORDINE DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Fk [Wb]	ϕ_k [rad]
1	-6,15E-05	-4,10E-05	5,23E-05	-0,588
2	-1,76E-05	-2,12E-05	1,95E-05	-0,877
3	-7,31E-06	-4,31E-06	6,00E-06	-0,532
4	-4,77E-06	8,30E-07	3,42E-06	0,172
5	-4,70E-06	4,10E-07	3,34E-06	0,085
6	-4,57E-06	-1,70E-07	3,24E-06	-0,037

Dallo script in codice MATLAB sono stati ottenuti inoltre i valori delle seguenti grandezze:

$$F_0 = -2.006 \cdot 10^{-6} \text{ [Wb]}$$

$$F = 5.642 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$F_{dis} = 2.129 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$THD = 40.75 \%$$

I valori efficaci delle armoniche principali nelle quali è stato scomposto il flusso magnetico $\Phi_c(\theta_m)$ ottenuti grazie allo script in codice MATLAB sono stati raccolti nella tabella qui sotto riportata:

Tabella 2.6: Scomposizione in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(t)$

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Y1 [Wb]	Y2 [Wb]	Y3 [Wb]	Y4 [Wb]	Y5 [Wb]	Y6 [Wb]
0	-9,02E-05	-6,15E-05	-1,76E-05	-7,31E-06	-4,77E-06	-4,70E-06	-4,57E-06
0,070	-1,01E-04	-6,66E-05	-2,28E-05	-8,43E-06	-3,61E-06	-3,34E-06	-3,18E-06
0,140	-1,07E-04	-7,04E-05	-2,62E-05	-8,09E-06	-1,35E-06	-4,12E-07	3,09E-07
0,209	-1,10E-04	-7,28E-05	-2,76E-05	-6,36E-06	1,32E-06	2,71E-06	3,60E-06
0,279	-1,10E-04	-7,38E-05	-2,68E-05	-3,52E-06	3,59E-06	4,56E-06	4,51E-06
0,349	-1,07E-04	-7,34E-05	-2,39E-05	-7,76E-08	4,77E-06	4,28E-06	2,43E-06
0,419	-1,01E-04	-7,16E-05	-1,92E-05	3,38E-06	4,49E-06	1,99E-06	-1,25E-06
0,489	-9,29E-05	-6,84E-05	-1,31E-05	6,25E-06	2,85E-06	-1,22E-06	-4,11E-06
0,559	-8,16E-05	-6,38E-05	-5,85E-06	8,05E-06	3,49E-07	-3,86E-06	-4,24E-06
0,628	-6,82E-05	-5,80E-05	1,80E-06	8,45E-06	-2,26E-06	-4,70E-06	-1,57E-06
0,698	-5,37E-05	-5,10E-05	9,32E-06	7,39E-06	-4,19E-06	-3,34E-06	2,14E-06
0,768	-3,95E-05	-4,31E-05	1,61E-05	5,05E-06	-4,84E-06	-4,12E-07	4,43E-06
0,838	-2,66E-05	-3,44E-05	2,17E-05	1,84E-06	-4,02E-06	2,70E-06	3,80E-06
0,908	-1,52E-05	-2,49E-05	2,55E-05	-1,69E-06	-1,98E-06	4,56E-06	6,47E-07
0,977	-5,63E-06	-1,50E-05	2,74E-05	-4,92E-06	6,63E-07	4,28E-06	-2,93E-06
1,047	2,36E-06	-4,78E-06	2,72E-05	-7,31E-06	3,10E-06	2,00E-06	-4,57E-06
1,117	9,09E-06	5,53E-06	2,48E-05	-8,43E-06	4,60E-06	-1,22E-06	-3,18E-06
1,187	1,48E-05	1,57E-05	2,06E-05	-8,09E-06	4,70E-06	-3,86E-06	3,08E-07
1,257	1,97E-05	2,56E-05	1,47E-05	-6,36E-06	3,37E-06	-4,70E-06	3,60E-06
1,326	2,38E-05	3,50E-05	7,72E-06	-3,52E-06	1,02E-06	-3,34E-06	4,51E-06
1,396	2,73E-05	4,37E-05	1,22E-07	-7,77E-08	-1,65E-06	-4,13E-07	2,43E-06
1,466	3,02E-05	5,16E-05	-7,48E-06	3,38E-06	-3,81E-06	2,70E-06	-1,25E-06
1,536	3,25E-05	5,84E-05	-1,45E-05	6,25E-06	-4,81E-06	4,56E-06	-4,11E-06
1,606	3,42E-05	6,42E-05	-2,04E-05	8,05E-06	-4,36E-06	4,28E-06	-4,24E-06
1,676	3,54E-05	6,86E-05	-2,47E-05	8,45E-06	-2,58E-06	2,00E-06	-1,57E-06
1,745	3,62E-05	7,18E-05	-2,71E-05	7,39E-06	-1,11E-08	-1,22E-06	2,14E-06
1,815	3,66E-05	7,35E-05	-2,74E-05	5,05E-06	2,56E-06	-3,86E-06	4,43E-06
1,885	3,67E-05	7,38E-05	-2,56E-05	1,84E-06	4,35E-06	-4,70E-06	3,80E-06
1,955	3,67E-05	7,27E-05	-2,18E-05	-1,69E-06	4,82E-06	-3,34E-06	6,47E-07
2,025	3,63E-05	7,01E-05	-1,63E-05	-4,92E-06	3,82E-06	-4,13E-07	-2,93E-06
2,094	3,61E-05	6,62E-05	-9,55E-06	-7,31E-06	1,67E-06	2,70E-06	-4,57E-06
2,164	3,60E-05	6,10E-05	-2,05E-06	-8,43E-06	-9,96E-07	4,56E-06	-3,18E-06
2,234	3,61E-05	5,47E-05	5,61E-06	-8,09E-06	-3,36E-06	4,28E-06	3,08E-07
2,304	3,64E-05	4,72E-05	1,28E-05	-6,36E-06	-4,70E-06	2,00E-06	3,60E-06
2,374	3,61E-05	3,88E-05	1,91E-05	-3,52E-06	-4,61E-06	-1,22E-06	4,51E-06
2,443	3,47E-05	2,97E-05	2,38E-05	-7,79E-08	-3,12E-06	-3,86E-06	2,43E-06
2,513	3,18E-05	2,00E-05	2,67E-05	3,38E-06	-6,85E-07	-4,70E-06	-1,25E-06
2,583	2,63E-05	9,91E-06	2,76E-05	6,25E-06	1,96E-06	-3,34E-06	-4,11E-06
2,653	1,82E-05	-3,77E-07	2,63E-05	8,05E-06	4,01E-06	-4,13E-07	-4,24E-06
2,723	7,27E-06	-1,07E-05	2,29E-05	8,45E-06	4,84E-06	2,70E-06	-1,57E-06
2,793	-6,06E-06	-2,07E-05	1,78E-05	7,39E-06	4,20E-06	4,56E-06	2,14E-06
2,862	-2,16E-05	-3,04E-05	1,13E-05	5,05E-06	2,28E-06	4,28E-06	4,43E-06
2,932	-3,91E-05	-3,95E-05	3,96E-06	1,84E-06	-3,27E-07	2,00E-06	3,80E-06
3,002	-5,77E-05	-4,78E-05	-3,72E-06	-1,69E-06	-2,84E-06	-1,22E-06	6,47E-07
3,072	-7,54E-05	-5,52E-05	-1,11E-05	-4,92E-06	-4,48E-06	-3,86E-06	-2,93E-06
3,142	-9,02E-05	-6,15E-05	-1,76E-05	-7,31E-06	-4,77E-06	-4,70E-06	-4,57E-06

I grafici delle prime sei armoniche che compongono il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ vengono riportati nella figura sottostante, dalla quale si possono ricavare per ognuna di esse ampiezza e fase:

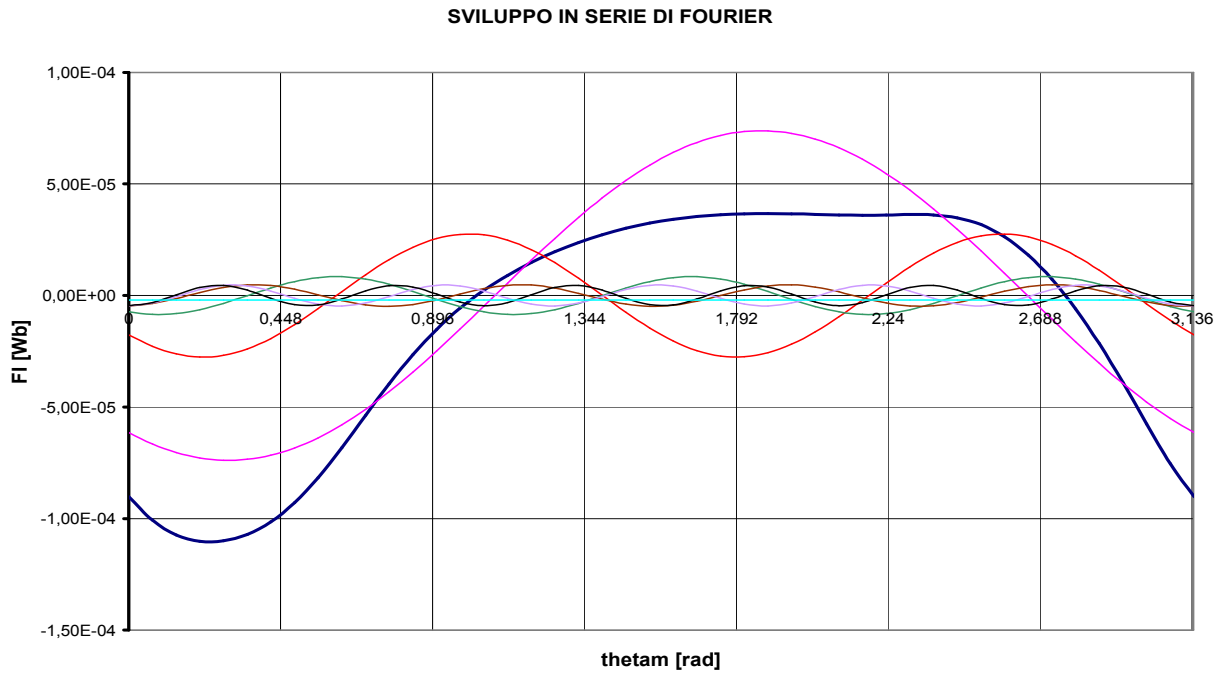


Fig. 2.31: Scomposizione in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$

In virtù della (2.15) l'armonica fondamentale sarà espressa dalla seguente funzione:

$$\lambda_1(\theta_m) = a_1 \cos(2p\theta_m) + b_1 \sin(2p\theta_m)$$

Nella quale i coefficienti a_1 e b_1 sono noti, in quanto ricavati mediante l'implementazione dello script in codice MATLAB e riportati nella tabella (2.5). L'espressione finale della forza elettromotrice indotta sarà pertanto esprimibile mediante la (2.16), e la corrispondente forma d'onda viene riportata nella figura sottostante:

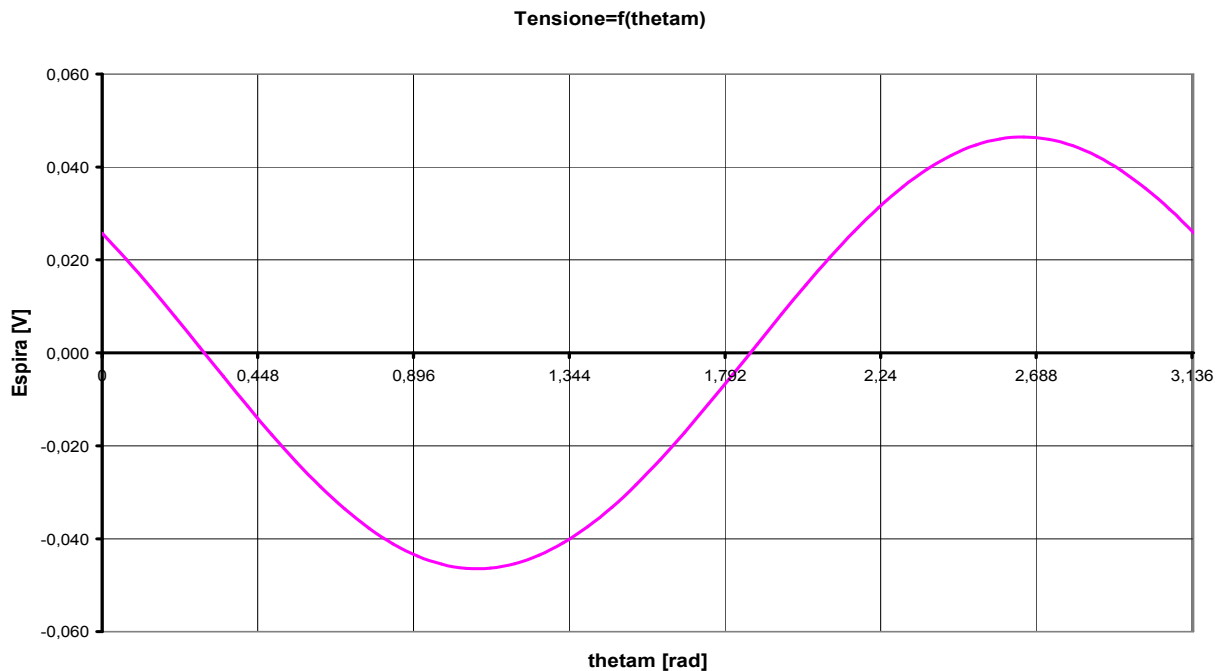


Fig. 2.32: Tensione indotta nella bobina a carico

Il valore massimo della tensione indotta nell' avvolgimento di statore ottenuto dalla Fig.2.32 è risultato pari a:

$$E_{max} = 0.046 \text{ [V/spira]}$$

Valore circa pari al doppio del corrispondente valore massimo di tensione indotta nella bobina funzionante a vuoto.

2.1.6 Considerazioni sul modello progettato

Eseguita l' analisi mediante software FEMM del modello di microturbina progettato al fine di comprenderne a pieno il comportamento elettromagnetico, ci si pone ora il compito di valutare la "bontà" del progetto realizzato.

Al fine di esprimere un grado di giudizio sul modello proposto è necessario valutare con attenzione i risultati ottenuti dalla simulazione, sia nel funzionamento a vuoto sia in quello a carico. In particolare si devono valutare con attenzione i grafici delle principali grandezze elettriche e meccaniche ottenuti in funzione dell' angolo meccanico θ_m , per stabilire se il modello suggerito presenta le caratteristiche necessarie per poter essere effettivamente costruito.

Valutazione della configurazione di campo \vec{B}

Per prima cosa si considerino con attenzione le simulazioni del modello funzionante a vuoto e a carico riportate rispettivamente in Fig.2.10 ed in Fig.2.22, nelle quali viene raffigurata la densità di campo di induzione magnetica nelle diverse regioni.

In entrambe le figure si possono notare diverse linee di flusso che si richiudono attraversando regioni d' aria piuttosto ampie; risulta pertanto evidente che una microturbina realizzata con una tale configurazione geometrica presenterà flussi dispersi di notevole intensità.

Questo non è certamente un aspetto positivo, poichè comporta un valore elevato delle induttanze di dispersione ad essi associate.

Valutazione del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$

Il flusso concatenato costituisce una delle grandezze di maggior interesse, poichè da esso dipende la qualità della forza elettromotrice generata dalla microturbina. È pertanto opportuno osservare con accuratezza la forma d' onda che esso presenta al variare dell' angolo meccanico θ_m sia nel funzionamento a vuoto sia in quello a carico.

Funzionamento a vuoto

Si consideri il grafico della funzione $\Phi_c(\theta_m)$ riportata in Fig.2.16, nella quale vengono riportati i valori di flusso concatenato con la bobina di statore al variare della posizione θ_m del rotore. Il valore massimo di flusso ottenuto è risultato pari a:

$$\Lambda_c = 5.58 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

La quale presenta periodo $2T = \pi$ [rad] rispetto all' angolo meccanico, e pulsazione ω_s proporzionale al numero di poli, ovvero:

$$\omega_s = 2p \cdot \omega_m \quad (2.51)$$

Osservando il grafico di $\Phi_c(\theta_m)$ si nota immediatamente che la sua forma d' onda è tutt' altro che sinusoidale, ma presenta una forte diminuzione di ampiezza per valori di θ_m compresi tra 0.5 e 1.5 [rad].

Esaminando lo sviluppo in serie di Fourier riportato in Fig.2.20 è evidente la presenza di un notevole contenuto armonico, nel quale si riscontra la presenza di una componente di seconda armonica di ampiezza elevata (circa $2.13 \cdot 10^{-5}$ [Wb]) che comporta un considerevole effetto distorcente.

Questo aspetto della funzione $\Phi_c(\theta_m)$ è negativo, poichè la forma d'onda ideale dovrebbe essere il più possibile somigliante alla forma d'onda della tensione generata da un generatore sincrono, ovvero perfettamente sinusoidale e quindi priva di qualsiasi contenuto armonico.

Funzionamento a carico

Si consideri ora la Fig.2.26 nella quale viene riportato il grafico del flusso concatenato in funzione dell'angolo meccanico θ_m considerando il microgeneratore funzionante a carico, con $i(\theta_m)$ la corrente che percorre l'avvolgimento di statore. Il valore massimo in modulo raggiunto dalla funzione $\Phi_c(\theta_m)$ è risultato pari a:

$$\Lambda_c = 1.102 \cdot 10^{-4} \text{ [Wb]}$$

Anche la forma d'onda del flusso concatenato caratteristica del modello funzionante a carico è caratterizzata periodo $2T = \pi$ [rad] rispetto all'angolo meccanico, e pulsazione elettrica ω_s pari a:

$$\omega_s = 2p \cdot \omega_m$$

Il grafico di $\Phi_c(\theta_m)$ presenta un andamento molto distante dalla forma sinusoidale, e come si può osservare dalla Fig.2.31 è caratterizzato da un notevole contenuto armonico. Anche in questo caso la componente che causa il maggior effetto distorcente è la seconda armonica, di ampiezza circa pari a $2.74 \cdot 10^{-5}$ [Wb].

Si riscontra pertanto anche nel funzionamento a carico che il modello di microturbina progettato è caratterizzato da un flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ la cui forma d'onda presenta un considerevole contenuto armonico distorcente, ed è molto distante dalla forma d'onda perfettamente sinusoidale che si era prefissato di ottenere.

Valutazione della tensione indotta

La forma d'onda della forza elettromotrice indotta presenta andamento sinusoidale sia nel funzionamento a vuoto che in quello a carico, questo perchè la funzione $e(\theta_m)$ è stata determinata come derivata della componente fondamentale $\lambda_1(\theta_m)$ del flusso concatenato. Tuttavia il valore massimo ottenuto nelle due diverse modalità di funzionamento è differente, e viene qui di seguito riportato:

Funzionamento a vuoto

Il valore massimo della tensione indotta $e(\theta_m)$ ottenuto è risultato pari a:

$$E = 0.026 \text{ [V]}$$

Con periodo $2T = \pi$ [rad] in riferimento all'angolo meccanico θ_m .

Funzionamento a carico

Il valore massimo della tensione indotta $e(\theta_m)$ ottenuto è risultato pari a:

$$E = 0.046 \text{ [V]}$$

Con periodo $2T = \pi$ [rad] in riferimento all'angolo meccanico θ_m .

Valutazione della coppia sul rotore

Funzionamento a vuoto

In Fig.2.17 è stato riportato l'andamento grafico della coppia agente sul rotore in funzione dell'angolo meccanico θ_m , tale andamento risulta essere oscillante e presenta valore medio pari a:

$$T_m = 0.75 \text{ [mNm]}$$

Ottenuto in corrispondenza ad un valore di θ_m pari a 3.002 [rad], a dimostrazione del fatto che il rotore tende ad impuntarsi (come era logico prevedere) in vicinanza ai magneti permanenti di statore. La massima oscillazione di coppia è risultata pari a:

$$\Delta T = 41.6 \text{ [mNm]}$$

Pur essendo il modello di microturbina progettato di piccole dimensioni un tale valore di massima oscillazione di coppia non è indifferente, ed è preludio di una macchina elettrica soggetta ad impuntamento.

Funzionamento a carico

Nel funzionamento a carico, il valore medio di coppia raggiunto è risultato pari a:

$$T_m = 39.5 \text{ [mNm]}$$

Per quanto riguarda la forma d'onda della coppia agente sul rotore riportata in Fig.2.28 è immediato notare che i valori più elevati di coppia si ottengono per valori di angolo meccanico corrispondenti a $\theta_m = k \cdot \pi$, ovvero quando l'asse del rotore è parallelo all'asse magnetico dell'avvolgimento di statore. Un parametro di fondamentale importanza è la massima oscillazione di coppia, rappresentata con il simbolo ΔT ; essa viene definita come la differenza algebrica tra il valore massimo ed il valore minimo della funzione $T(\theta_m)$. Il valore massimo di oscillazione di coppia del modello funzionante a carico è risultato pari a:

$$\Delta T = 123 \text{ [mNm]}$$

Un valore così elevato di ΔT è indice di una macchina elettrica rotante soggetta ad **impuntamento**, ovvero il rotore presenta la tendenza a mantenere una posizione fissa per valori di θ_m proporzionali a $k\pi$. Questo è certamente un aspetto negativo, poichè la forma d'onda della coppia ideale dovrebbe presentare un valore di ΔT molto basso, in modo da ridurre al minimo il fenomeno dell'impuntamento.

Valutazione dell'energia e della coenergia

Sia nel funzionamento a vuoto sia in quello a carico i grafici di energia e coenergia magnetica ottenuti risultano perfettamente sovrapponibili, questo dimostra che il circuito magnetico lavora in condizioni di linearità. Osservando attentamente le forme d'onda riportate in Fig.2.29 e Fig.2.30 il massimo valore dell'energia W_m e coenergia W_c riscontrato è risultato pari a:

$$W_{max} = 0.287 \text{ [J]}$$

Il valore dell'angolo meccanico corrispondente a W_{max} è invece pari a:

$$\theta_{max} = 0.140 \text{ [rad]}$$

Conclusioni

Le considerazioni effettuate sui valori riscontrati delle principali grandezze elettromeccaniche e delle loro forme d'onda in funzione dell'angolo meccanico θ_m portano all'espressione di un giudizio negativo nei confronti del modello progettato.

Al fine di ottenere un modello di microturbina che presenti caratteristiche più vicine a quelle ideali sono stati proposti ulteriori progetti, ottenuti modificando e perfezionando la configurazione geometrica inizialmente proposta ed analizzando di volta in volta le prestazioni fornite dal modello simulato.

2.2 PROGETTO DEL SECONDO MODELLO

2.2.1 Progetto della geometria

Al fine di migliorare le prestazioni del modello di microturbina precedentemente proposto sono state apportate delle modifiche alla configurazione geometrica del modello iniziale. In particolare si è pensato di aggiungere due sporgenze al circuito ferromagnetico di statore, in modo tale da “guidare” il flusso magnetico principale prodotto dai magneti permanenti di statore ad attraversare il rotore riducendo notevolmente il tratto d’aria incontrato.

Grazie a queste modifiche apportate alla geometria del modello si ipotizza di ottenere una riduzione dei flussi dispersi, con conseguente riduzione delle induttanze di dispersione ad essi associate. Le salienze di statore introdotte si prevedono appositamente sagomate seguendo fedelmente la curvatura del rotore, in modo tale da consentire al flusso uscente dai poli di mantenere direzione ortogonale rispetto alla superficie ferromagnetica.

L’introduzione delle suddette modifiche dovrebbe comportare un miglioramento della forma d’onda del flusso concatenato con l’avvolgimento di statore $\Phi_c(\theta_m)$ (ed un conseguente miglioramento della forma d’onda della tensione indotta), in aggiunta ad una riduzione della massima oscillazione di coppia ΔT . Naturalmente si tratta di ipotesi che dovranno essere confermate da un’attenta analisi eseguita mediante simulazione con il software FEMM.

Un’ulteriore modifica apportata al modello iniziale consiste nella riduzione dello spessore del traferro, sempre al fine di agevolare il percorso del flusso magnetico riducendo al minimo la lunghezza del tratto in aria. Si riporta qui di seguito la configurazione geometrica del secondo modello di microturbina progettato:

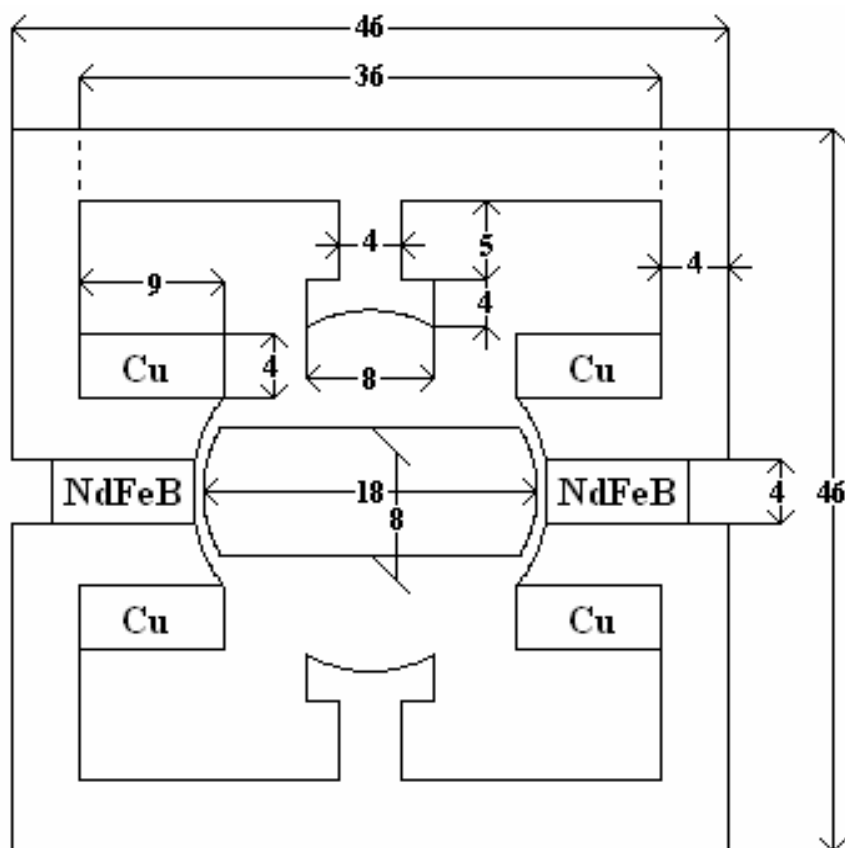


Fig. 2.33: Secondo modello di microturbina - SCALA 2:1

Una volta abbozzata la geometria del microgeneratore il passo successivo consiste nell’eseguirne la simulazione mediante software FEMM al fine di ottenere le prestazioni della macchina.

2.2.2 Simulazione del modello a vuoto

Al fine di determinare le prestazioni del secondo modello di microturbina progettato è necessario disporre dei grafici caratteristici delle principali grandezze elettromeccaniche (coppia, flusso concatenato, forza elettromotrice, ecc..) tracciati in funzione dell'angolo meccanico θ_m .

Da una loro attenta osservazione si possono dedurre le prestazioni della microturbina progettata, e stabilire quindi se la geometria adottata è idonea o meno. Per eseguire una corretta simulazione mediante l'ausilio del software FEMM è stata seguita la seguente procedura:

Definizione del problema

Come precedentemente esposto, il primo passo da seguire consiste nella definizione del tipo di problema da porre sotto analisi, introducendo i dati iniziali necessari per effettuare la simulazione del modello. Nell'ambiente di lavoro FEMM, accedendo alla voce *Problem definition* sono state introdotte le seguenti impostazioni:

- *Problem type*: Planar
- *Length units*: Millimeters
- *Frequency*: 0 [Hz]
- *Depth*: 10 [mm]
- *Solver precision*: $1 \cdot 10^{-8}$

Disegno della geometria

Il passo successivo alla definizione del problema consiste nel disegnare nella finestra grafica iniziale del software FEMM la geometria del secondo modello di microturbina progettato. Anche in questo caso il disegno non è stato importato da AUTOCAD, ma è stato direttamente realizzato utilizzando snap e griglia messe a disposizione dal software. La figura qui di seguito riportata mette in risalto le caratteristiche geometriche del secondo tipo di microturbina elaborato:

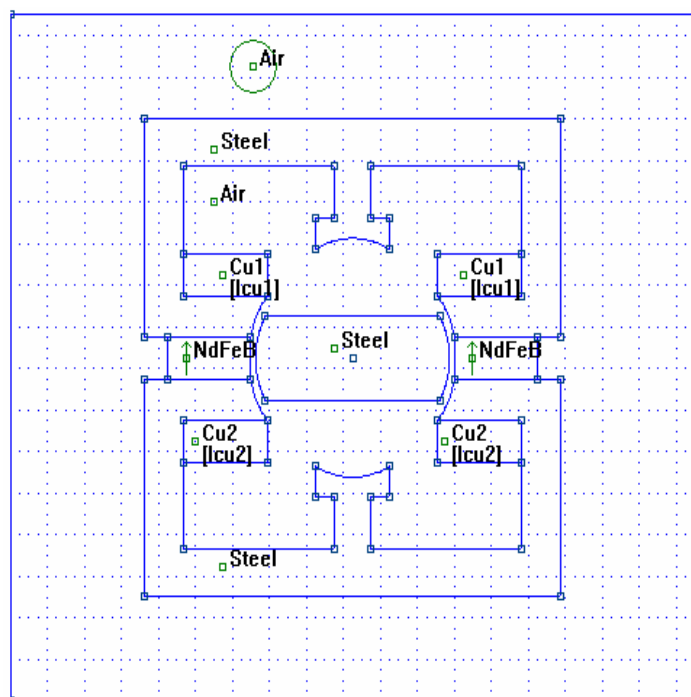


Fig. 2.34: Secondo modello di microturbina

Condizioni al contorno

L'assegnazione delle condizioni al contorno permette di imporre alle linee di flusso di seguire una ben precisa direzione in prossimità delle linee che definiscono il bordo del dominio. In particolare, così come nel primo modello, sono state introdotte le seguenti assegnazioni:

- *Condizione di Neumann*: è stata assegnata la condizione $\frac{d\vec{A}}{dn} = 0$
- *Condizione di Dirichlet*: è stata assegnata la condizione $\vec{A} = 0$

Definizione dei materiali

A questo punto è necessario definire per ogni regione il materiale di cui essa è costituita, esplicitando le grandezze fisiche che ne descrivono il comportamento elettromagnetico. I materiali definiti e le loro caratteristiche vengono elencati qui di seguito:

- *Acciaio*:
è il materiale ferromagnetico con il quale si prevede di realizzare il rotore ed il nucleo di statore della microturbina, è caratterizzato dalle seguenti grandezze fisiche:
 - permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 760$
 - permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 760$
 - curva di magnetizzazione $B = f(H)$ non lineare:

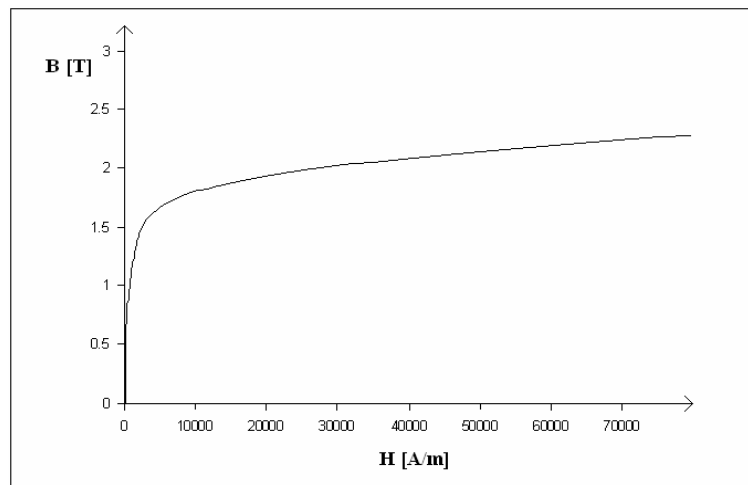


Fig. 2.35: Curva di magnetizzazione dell'acciaio

- *Aria*:
è il materiale che circonda il modello di microturbina che si prevede di realizzare, esso sarà caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:
 - permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
 - conducibilità elettrica $\sigma = 0$ [Ms/m].
- *Rame*:
è il materiale con il quale si prevede di realizzare l'avvolgimento di statore sede di forza elettromotrice indotta, esso sarà caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:
 - permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
 - conducibilità elettrica $\sigma = 58$ [Ms/m].
 - curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare.

- *Lega di Neodimio:*

è il materiale con il quale si prevede di realizzare i magneti permanenti della microturbina, ossia la principale sorgente di campo magnetico. In particolare il materiale magnetico impiegato è una lega di Neodimio Ferro e Boro (NdFeB) e presenta le seguenti caratteristiche:

- permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 1.048$
- permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 1.048$
- campo coercitivo: $H_c = 950000$ [A/m].
- conducibilità elettrica: $\sigma = 0.667$ [Ms/m].
- induzione magnetica residua: $B_{rem} = 1.05$ [T].
- curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare:

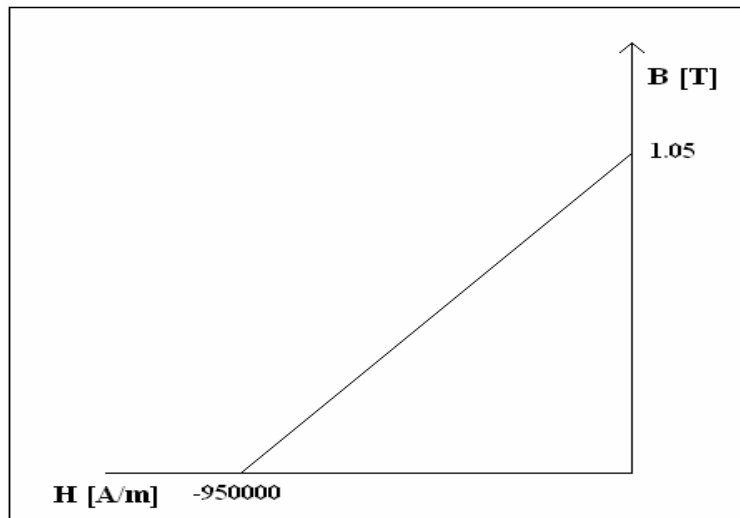


Fig. 2.36: Curva di magnetizzazione del NdFeB

Definizione delle sorgenti

Nel funzionamento a vuoto l' unica sorgente di campo magnetico presente è data dai magneti permanenti posti sullo statore, poichè l' avvolgimento sede di forza elettromotrice indotta non essendo connesso a nessun carico elettrico non viene percorso da corrente.

Creazione della mesh

Grazie all' opzione *Create Mesh* presente nella schermata principale del programma FEMM è possibile attivare l' applicazione *Triangle.exe*, la quale consente la creazione automatica della mesh, necessaria per l' implementazione del metodo agli elementi finiti. La mesh generata viene riportata nella sottostante figura, nella quale si possono osservare i vari elementi triangolari costruiti, i quali presenteranno dimensioni minori nelle zone di maggior interesse (in particolare al traferro) e dimensioni maggiori nelle zone in cui non vi è la necessita di determinare i valori dei campi \vec{B} ed \vec{H} con molta precisione.

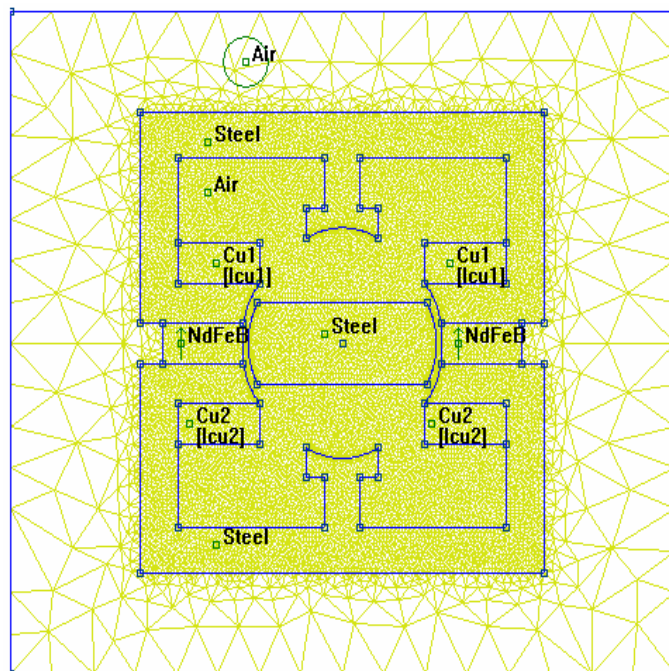


Fig. 2.37: Mesh ad elementi triangolari

Visualizzazione dei risultati

Una volta creata la mesh ed eseguita l' analisi del modello definito il risultato della simulazione viene riprodotto nella "*Femm View*", una finestra di dialogo che permette all' utente di visualizzare la soluzione ottenuta, ovvero il valore di campo di induzione magnetica \vec{B} e le linee di flusso nelle diverse regioni del modello. Il risultato della simulazione creato nella "*Femm View*" viene riportato in Fig.2.40.

Si osserva pertanto che l' andamento delle linee di flusso è del tutto simile a quello ottenuto dalla simulazione del primo modello di microturbina funzionante a vuoto, ma la densità di campo \vec{B} nelle diverse zone del dominio risulta più elevata. Infatti al traferro ed in prossimità dei magneti permanenti si raggiungono valori di $|\vec{B}|$ maggiori di 1.488 [T], mentre nel precedente modello al massimo si arrivava ad 1.077 [T].

La presenza delle espansioni polari riduce la lunghezza del tratto in aria che il flusso magnetico $\Phi(t)$ percorre, e pertanto ne facilita il passaggio attraverso il rotore. Tutto questo riduce sensibilmente le dispersioni di flusso nell' aria, in particolare nelle zone vicine alle espansioni polari di statore. Questo è un aspetto certamente positivo, pertanto viene da pensare che le modifiche apportate alla geometria si riveleranno producenti.

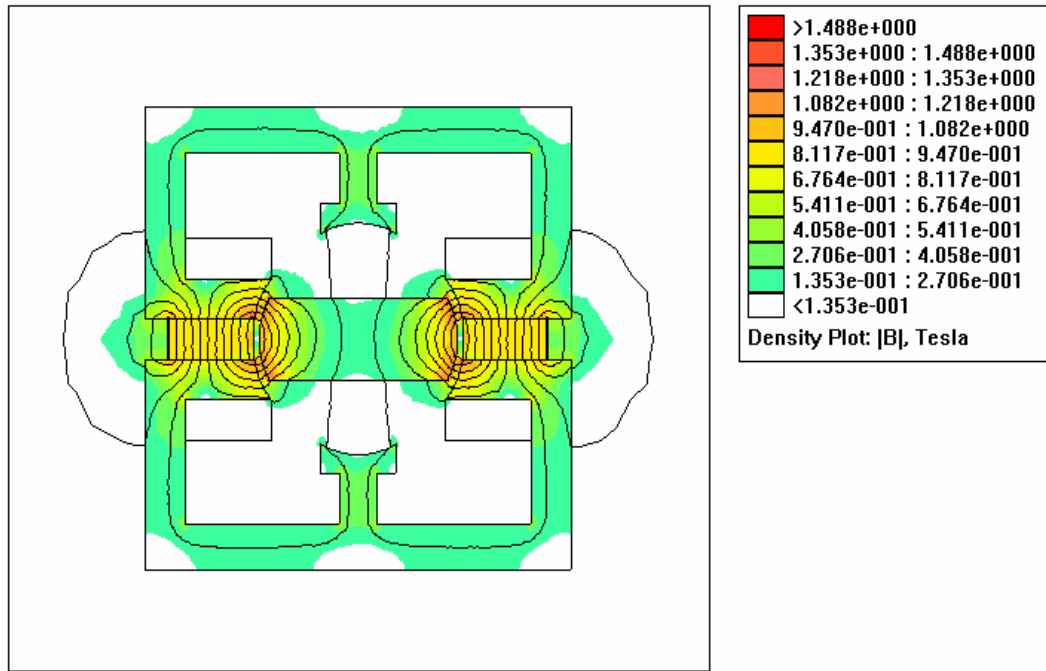


Fig. 2.38: Simulazione a vuoto del secondo modello

Si procede ora con l'analisi del potenziale vettore magnetico \vec{A} , del campo di induzione magnetica \vec{B} e del campo \vec{H} in funzione della lunghezza del traferro:

Potenziale vettore magnetico

L'andamento del potenziale vettore magnetico (componente A_z nel caso bidimensionale) lungo il traferro viene qui di seguito riportato. Come si può osservare dalla Fig.2.41 esso risulta del tutto simile all'andamento di A_z del primo modello di microturbina presentato precedentemente in Fig.2.11.

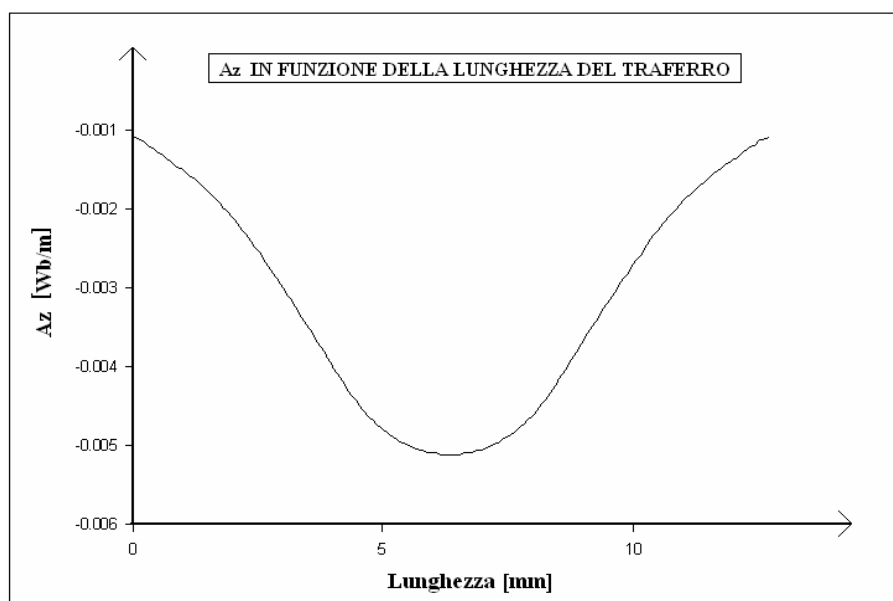


Fig. 2.39: Componente A_z del potenziale vettore magnetico al traferro

Campo di induzione magnetica

Si riporta nella figura sottostante il modulo del campo di induzione magnetica $|\dot{B}|$ lungo la lunghezza del traferro, ottenuto considerando il rotore nella sua posizione iniziale come in Fig.2.40. L'andamento di $|\dot{B}|$ ottenuto è molto simile a quello del primo modello esaminato in Fig.2.12, ma con valori più elevati a causa della minore ampiezza del traferro.

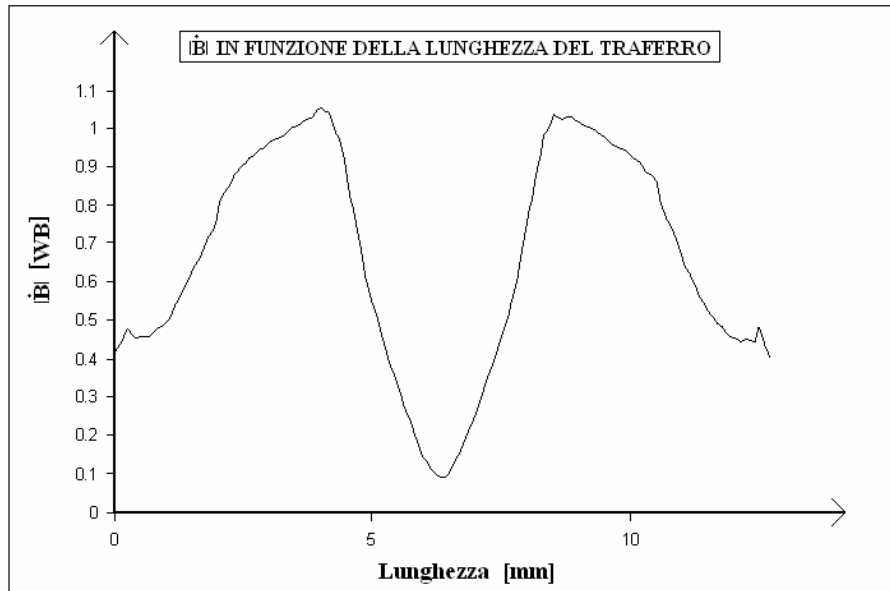


Fig. 2.40: Modulo del campo di induzione magnetica al traferro

Campo magnetico

Analogamente a quanto fatto per il campo \dot{B} si riporta qui di seguito l'andamento del modulo del campo \dot{H} lungo il traferro, considerando il rotore fisso nella sua posizione iniziale. I grafici di $|\dot{B}|$ e $|\dot{H}|$ risultano perfettamente sovrapponibili, poichè il traferro in aria è caratterizzato da permeabilità μ_0 costante.

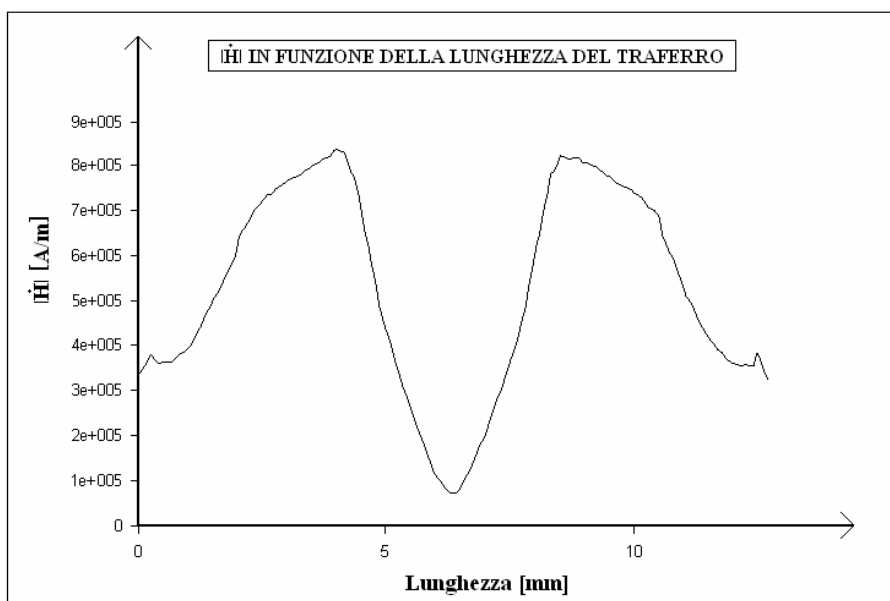


Fig. 2.41: Modulo del campo magnetico magnetico al traferro

Analisi ricorsiva mediante software LUA

Al fine di analizzare il comportamento elettromagnetico del modello progettato è necessario disporre dei valori della coppia, del flusso concatenato, della tensione indotta ecc.. al variare dell'angolo meccanico θ_m ; in modo tale da tracciarne i grafici corrispondenti. Per eseguire un elevato numero di simulazioni variando di volta in volta la posizione del rotore e registrare in un file di testo i valori delle grandezze elettromeccaniche ci si è serviti dello stesso script in codice LUA utilizzato per analizzare il modello precedente di microturbina. I valori ottenuti sono stati riportati nella tabella sottostante:

Tabella 2.7: Risultati dall' analisi a vuoto del modello 2

Thetam [°]	Flusso [Wb]	Tensione [V]	Coppia [Nm]	Energia [J]	Coenergia [J]
0,000	-2,38E-08	0,0472	0,0000	0,2813	0,2814
0,070	-2,66E-05	0,0468	0,0047	0,2814	0,2816
0,140	-5,10E-05	0,0454	0,0024	0,2816	0,2819
0,209	-7,14E-05	0,0431	-0,0048	0,2811	0,2819
0,279	-8,59E-05	0,0401	-0,0049	0,2801	0,2814
0,349	-9,51E-05	0,0362	-0,0028	0,2790	0,2810
0,419	-9,97E-05	0,0316	-0,0004	0,2785	0,2809
0,489	-1,01E-04	0,0264	-0,0059	0,2778	0,2805
0,558	-9,79E-05	0,0207	-0,0130	0,2773	0,2801
0,628	-9,19E-05	0,0146	-0,0223	0,2762	0,2788
0,698	-8,30E-05	0,0082	-0,0224	0,2749	0,2773
0,768	-7,22E-05	0,0017	-0,0178	0,2737	0,2758
0,838	-6,03E-05	-0,0049	-0,0072	0,2730	0,2747
0,907	-4,80E-05	-0,0114	-0,0053	0,2729	0,2744
0,977	-3,64E-05	-0,0177	0,0047	0,2729	0,2741
1,047	-2,71E-05	-0,0236	0,0198	0,2736	0,2749
1,117	-2,05E-05	-0,0291	0,0289	0,2752	0,2766
1,187	-1,57E-05	-0,0340	0,0321	0,2768	0,2786
1,256	-1,19E-05	-0,0382	0,0310	0,2790	0,2812
1,326	-8,85E-06	-0,0417	0,0292	0,2804	0,2831
1,396	-6,12E-06	-0,0444	0,0257	0,2818	0,2852
1,466	-3,65E-06	-0,0462	0,0185	0,2825	0,2866
1,536	-1,22E-06	-0,0471	0,0073	0,2831	0,2876
1,605	1,22E-06	-0,0471	-0,0075	0,2830	0,2876
1,675	3,66E-06	-0,0462	-0,0190	0,2825	0,2866
1,745	6,17E-06	-0,0444	-0,0252	0,2817	0,2851
1,815	8,87E-06	-0,0417	-0,0290	0,2804	0,2831
1,885	1,20E-05	-0,0382	-0,0317	0,2789	0,2811
1,954	1,57E-05	-0,0340	-0,0314	0,2771	0,2788
2,024	2,05E-05	-0,0291	-0,0294	0,2751	0,2766
2,094	2,71E-05	-0,0236	-0,0197	0,2738	0,2750
2,164	3,64E-05	-0,0177	-0,0034	0,2730	0,2742
2,234	4,80E-05	-0,0115	0,0041	0,2729	0,2743
2,303	6,03E-05	-0,0050	0,0086	0,2732	0,2749
2,373	7,22E-05	0,0016	0,0174	0,2738	0,2758
2,443	8,30E-05	0,0082	0,0225	0,2749	0,2773
2,513	9,19E-05	0,0146	0,0238	0,2761	0,2787
2,583	9,80E-05	0,0207	0,0134	0,2771	0,2799
2,652	1,01E-04	0,0264	0,0057	0,2778	0,2805
2,722	9,97E-05	0,0316	0,0016	0,2784	0,2808
2,792	9,50E-05	0,0361	0,0028	0,2791	0,2810
2,862	8,59E-05	0,0400	0,0056	0,2800	0,2813
2,932	7,15E-05	0,0431	0,0043	0,2811	0,2819
3,001	5,13E-05	0,0454	-0,0030	0,2815	0,2818
3,071	2,66E-05	0,0468	-0,0043	0,2815	0,2817
3,141	-3,04E-08	0,0472	0,0000	0,2813	0,2815

Grafico del flusso concatenato

Grazie ai dati raccolti in tabella 2.7 è possibile tracciare il grafico del flusso concatenato con la bobina di statore al variare dell'angolo meccanico θ_m . Al fine della realizzazione del suddetto grafico sono stati rilevati i valori del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ per 45 differenti valori della posizione angolare del rotore espressa dal parametro θ_m .

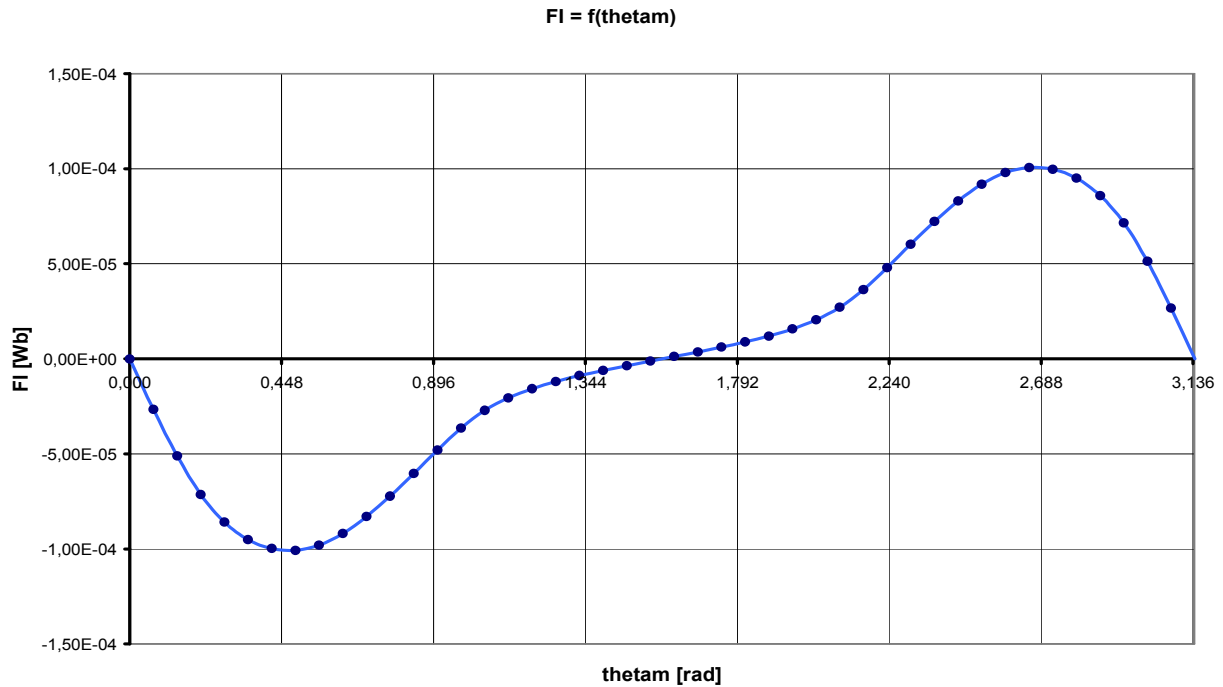


Fig. 2.42: Flusso concatenato in funzione di θ_m

Grafico della coppia

I valori della coppia agente sul rotore durante il funzionamento a vuoto per diversi valori dell'angolo meccanico θ_m sono stati riportati nella figura sottostante:

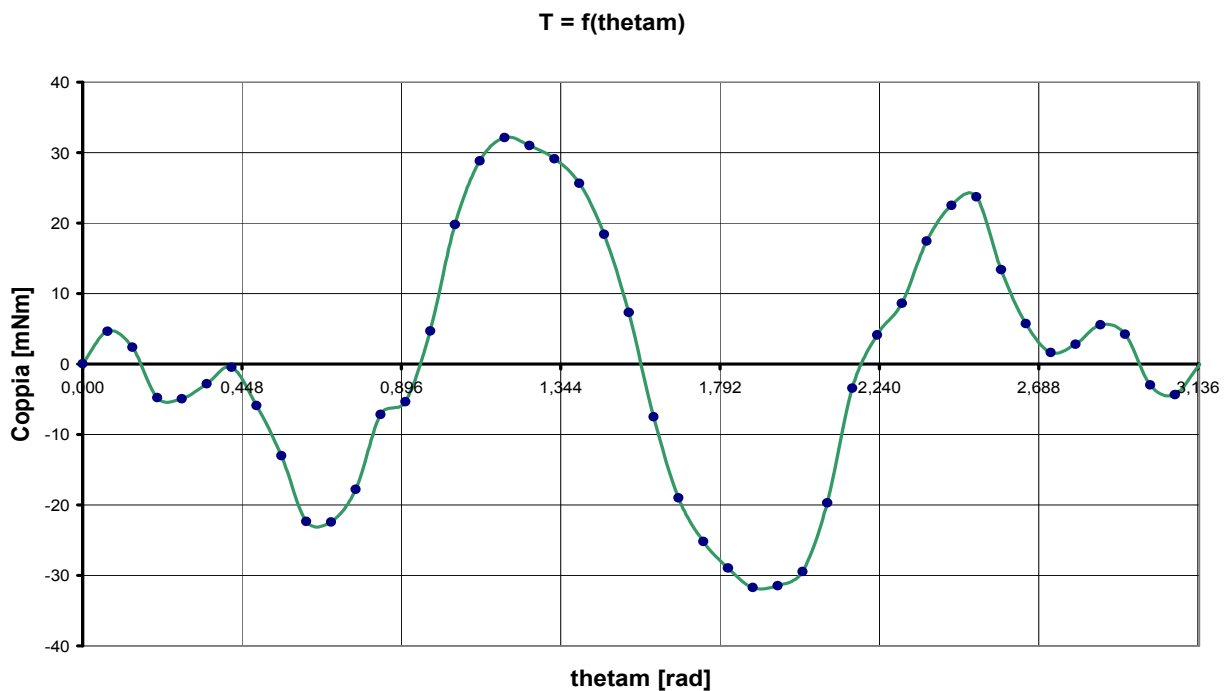


Fig. 2.43: Coppia sul rotore in funzione di θ_m

Grafico dell' energia magnetica

Si riporta nella figura sottostante il grafico dell' energia magnetica al variare della posizione angolare θ_m ; come si può notare risulta periodica di periodo pari a π [rad] e raggiunge il massimo valore per $\theta_m = 1.536$ [rad].

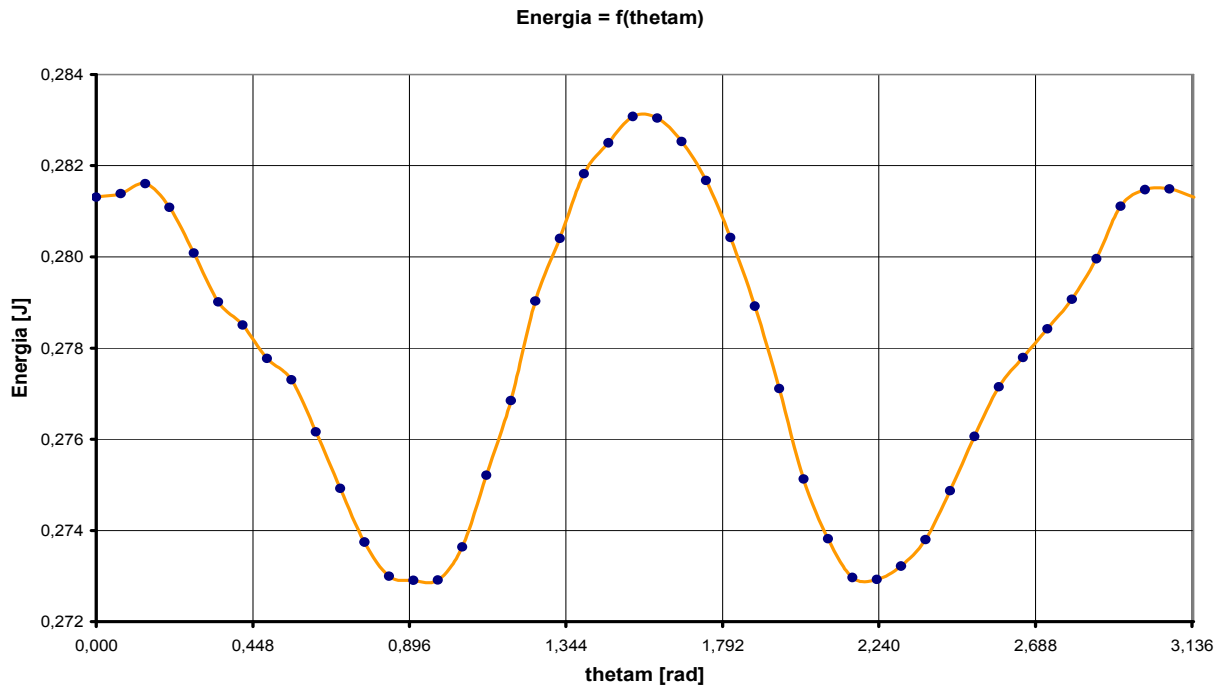


Fig. 2.44: Energia magnetica in funzione di θ_m

Grafico della Coenergia magnetica

Insieme all' energia magnetica si riporta nella seguente figura la coenergia magnetica messa in gioco nel volume totale occupato dal modello, in funzione dell' angolo meccanico θ_m .

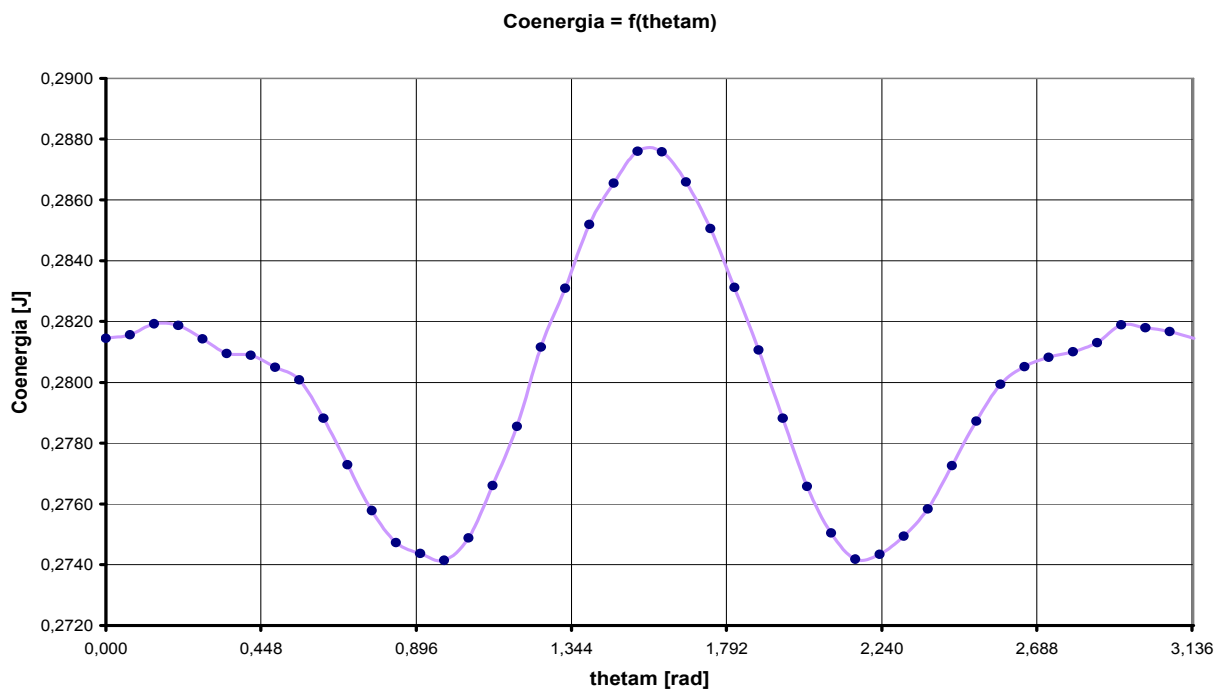


Fig. 2.45: Coenergia magnetica in funzione di θ_m

Forza elettromotrice indotta

Il valore della tensione indotta nell' avvolgimento di statore si determina applicando la relazione (2.3), ossia calcolando la derivata temporale del flusso concatenato:

$$e(t) = -\frac{d\Phi_c(t)}{dt}$$

In questo caso la funzione $\Phi_c(t)$ è definita solamente per punti, poichè il flusso concatenato non presenta una forma d' onda associabile ad una funzione matematica nota. Per una stima approssimata del grafico della tensione indotta in funzione dell' angolo meccanico θ_m si è proceduto a scomporre in serie di Fourier la forma d' onda di $\Phi_c(t)$ ottenuta per punti, secondo la relazione (2.4) ossia:

$$\Phi_c(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)]$$

Per applicare la (2.4) calcolando i coefficienti delle armoniche e tracciarne le forme d' onda in funzione di θ_m è stato realizzato uno script in codice matlab, il quale è già stato presentato a pagina 39 del precedente paragrafo. Grazie ad esso è stato possibile determinare il valore efficace F_k e la fase ϕ_k delle principale armoniche che compongono il flusso concatenato $\Phi_c(t)$.

I coefficienti delle armoniche sono stati ottenuti implementando nello script le relazioni (2.6) e (2.7) precedentemente menzionate, mentre i corrispondenti valori efficaci e le corrispondenti fasi sono state ottenute implementando le equazioni (2.9) e (2.10). I risultati ottenuti sono stati raccolti nella sottostante tabella:

Tabella 2.8: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(t)$

ORDINE DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Fk [Wb]	Øk [rad]
1	0	-7,52E-05	5,32E-05	1,571
2	0	-4,20E-05	2,97E-05	1,571
3	0	-7,66E-06	5,41E-06	1,570
4	0	-2,60E-07	1,90E-07	1,560
5	0	-1,75E-06	1,24E-06	1,564
6	0	-6,40E-07	4,50E-07	-1,561

Una volta determinate le funzioni rappresentative delle principali armoniche del flusso concatenato è immediato ricavare il **valore efficace** F , il **fattore di distorsione** F_{dis} ed il **Total harmonic distortion** THD di $\Phi_c(t)$ applicando rispettivamente le equazioni (2.45), (2.46) e (2.47):

$$F = 6.110 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$F_{dis} = 3.020 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$THD = 56.8 \%$$

Una volta eseguito lo sviluppo in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ è stato possibile determinare i valori delle principali armoniche al variare dell'angolo meccanico θ_m . I risultati ottenuti sono stati raccolti nella tabella sottostante:

Tabella 2.9: Sviluppo in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ del modello 2

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Y1 [Wb]	Y2 [Wb]	Y3 [Wb]	Y4 [Wb]	Y5 [Wb]	Y6 [Wb]
0,000	-2,38E-08	0	0	0	0	0	0
0,070	-2,66E-05	-1,05E-05	-1,16E-05	-3,12E-06	-1,38E-07	-1,12E-06	-4,76E-07
0,140	-5,10E-05	-2,07E-05	-2,22E-05	-5,69E-06	-2,34E-07	-1,72E-06	-6,37E-07
0,209	-7,14E-05	-3,06E-05	-3,12E-05	-7,28E-06	-2,59E-07	-1,52E-06	-3,76E-07
0,279	-8,59E-05	-3,98E-05	-3,77E-05	-7,62E-06	-2,05E-07	-5,99E-07	1,33E-07
0,349	-9,51E-05	-4,83E-05	-4,13E-05	-6,64E-06	-8,91E-08	5,97E-07	5,54E-07
0,419	-9,97E-05	-5,58E-05	-4,17E-05	-4,51E-06	5,39E-08	1,51E-06	6,09E-07
0,489	-1,01E-04	-6,23E-05	-3,89E-05	-1,60E-06	1,80E-07	1,72E-06	2,61E-07
0,558	-9,79E-05	-6,75E-05	-3,31E-05	1,59E-06	2,52E-07	1,13E-06	-2,60E-07
0,628	-9,19E-05	-7,15E-05	-2,47E-05	4,50E-06	2,47E-07	2,07E-09	-6,08E-07
0,698	-8,30E-05	-7,40E-05	-1,44E-05	6,63E-06	1,67E-07	-1,12E-06	-5,55E-07
0,768	-7,22E-05	-7,51E-05	-2,95E-06	7,62E-06	3,65E-08	-1,72E-06	-1,34E-07
0,838	-6,03E-05	-7,48E-05	8,70E-06	7,29E-06	-1,05E-07	-1,52E-06	3,75E-07
0,907	-4,80E-05	-7,29E-05	1,97E-05	5,70E-06	-2,15E-07	-6,01E-07	6,36E-07
0,977	-3,64E-05	-6,97E-05	2,91E-05	3,12E-06	-2,60E-07	5,96E-07	4,77E-07
1,047	-2,71E-05	-6,51E-05	3,63E-05	9,08E-09	-2,25E-07	1,51E-06	1,52E-09
1,117	-2,05E-05	-5,92E-05	4,07E-05	-3,11E-06	-1,22E-07	1,72E-06	-4,75E-07
1,187	-1,57E-05	-5,22E-05	4,19E-05	-5,69E-06	1,77E-08	1,13E-06	-6,37E-07
1,256	-1,19E-05	-4,42E-05	3,99E-05	-7,28E-06	1,52E-07	4,15E-09	-3,78E-07
1,326	-8,85E-06	-3,53E-05	3,48E-05	-7,62E-06	2,41E-07	-1,12E-06	1,31E-07
1,396	-6,12E-06	-2,57E-05	2,70E-05	-6,64E-06	2,56E-07	-1,72E-06	5,53E-07
1,466	-3,65E-06	-1,57E-05	1,71E-05	-4,51E-06	1,94E-07	-1,52E-06	6,09E-07
1,536	-1,22E-06	-5,29E-06	5,89E-06	-1,61E-06	7,22E-08	-6,03E-07	2,62E-07
1,605	1,22E-06	5,20E-06	-5,79E-06	1,58E-06	-7,11E-08	5,94E-07	-2,58E-07
1,675	3,66E-06	1,56E-05	-1,70E-05	4,49E-06	-1,93E-07	1,51E-06	-6,08E-07
1,745	6,17E-06	2,57E-05	-2,69E-05	6,63E-06	-2,56E-07	1,72E-06	-5,56E-07
1,815	8,87E-06	3,52E-05	-3,48E-05	7,62E-06	-2,41E-07	1,13E-06	-1,36E-07
1,885	1,20E-05	4,41E-05	-3,99E-05	7,29E-06	-1,53E-07	6,22E-09	3,74E-07
1,954	1,57E-05	5,22E-05	-4,19E-05	5,70E-06	-1,89E-08	-1,12E-06	6,36E-07
2,024	2,05E-05	5,92E-05	-4,07E-05	3,13E-06	1,21E-07	-1,72E-06	4,78E-07
2,094	2,71E-05	6,51E-05	-3,64E-05	1,82E-08	2,25E-07	-1,52E-06	3,03E-09
2,164	3,64E-05	6,97E-05	-2,92E-05	-3,10E-06	2,60E-07	-6,05E-07	-4,74E-07
2,234	4,80E-05	7,29E-05	-1,98E-05	-5,68E-06	2,16E-07	5,92E-07	-6,37E-07
2,303	6,03E-05	7,47E-05	-8,80E-06	-7,28E-06	1,07E-07	1,51E-06	-3,79E-07
2,373	7,22E-05	7,51E-05	2,85E-06	-7,62E-06	-3,53E-08	1,72E-06	1,30E-07
2,443	8,30E-05	7,40E-05	1,43E-05	-6,64E-06	-1,66E-07	1,13E-06	5,52E-07
2,513	9,19E-05	7,15E-05	2,46E-05	-4,52E-06	-2,47E-07	8,30E-09	6,10E-07
2,583	9,80E-05	6,76E-05	3,30E-05	-1,61E-06	-2,53E-07	-1,12E-06	2,64E-07
2,652	1,01E-04	6,24E-05	3,89E-05	1,57E-06	-1,81E-07	-1,72E-06	-2,57E-07
2,722	9,97E-05	5,59E-05	4,17E-05	4,48E-06	-5,51E-08	-1,52E-06	-6,07E-07
2,792	9,50E-05	4,84E-05	4,13E-05	6,62E-06	8,79E-08	-6,07E-07	-5,56E-07
2,862	8,59E-05	3,99E-05	3,78E-05	7,62E-06	2,04E-07	5,90E-07	-1,37E-07
2,932	7,15E-05	3,06E-05	3,12E-05	7,29E-06	2,58E-07	1,51E-06	3,73E-07
3,001	5,13E-05	2,08E-05	2,23E-05	5,71E-06	2,34E-07	1,73E-06	6,36E-07
3,071	2,66E-05	1,05E-05	1,17E-05	3,14E-06	1,39E-07	1,13E-06	4,79E-07
3,141	-3,04E-08	8,91E-08	9,95E-08	2,72E-08	1,23E-09	1,04E-08	4,55E-09

I grafici delle principali armoniche che compongono il flusso concatenato vengono riportati nella seguente figura, la quale riporta con ottima precisione il contenuto armonico della funzione $\Phi_c(\theta_m)$:

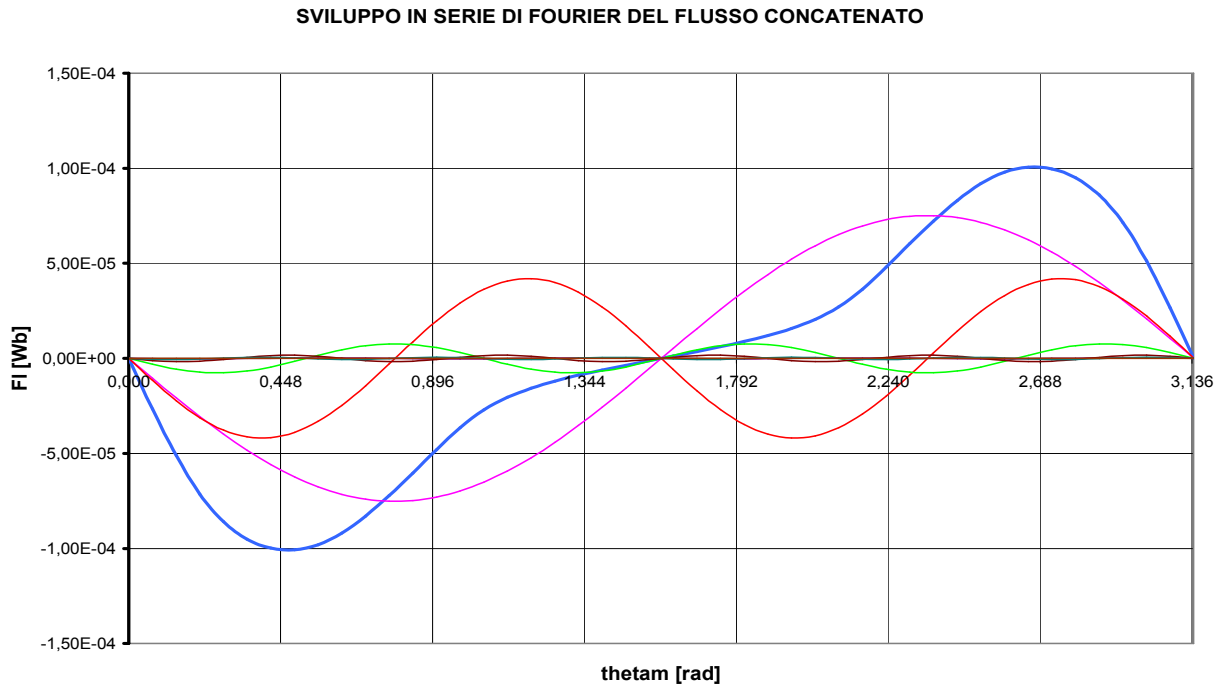


Fig. 2.46: Contenuto armonico del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ del modello 2

Grazie alla determinazione dell'armonica principale $\lambda_1(\theta_m)$ è stato possibile calcolare con facilità i parametri a_1 e b_1 necessari per definire la funzione $e(\theta_m)$ mediante la seguente espressione:

$$e(\theta_m) = \omega_m \cdot 2p \cdot a_1 \sin(2p\theta_m) - \omega_m \cdot 2p \cdot b_1 \cos(2p\theta_m)$$

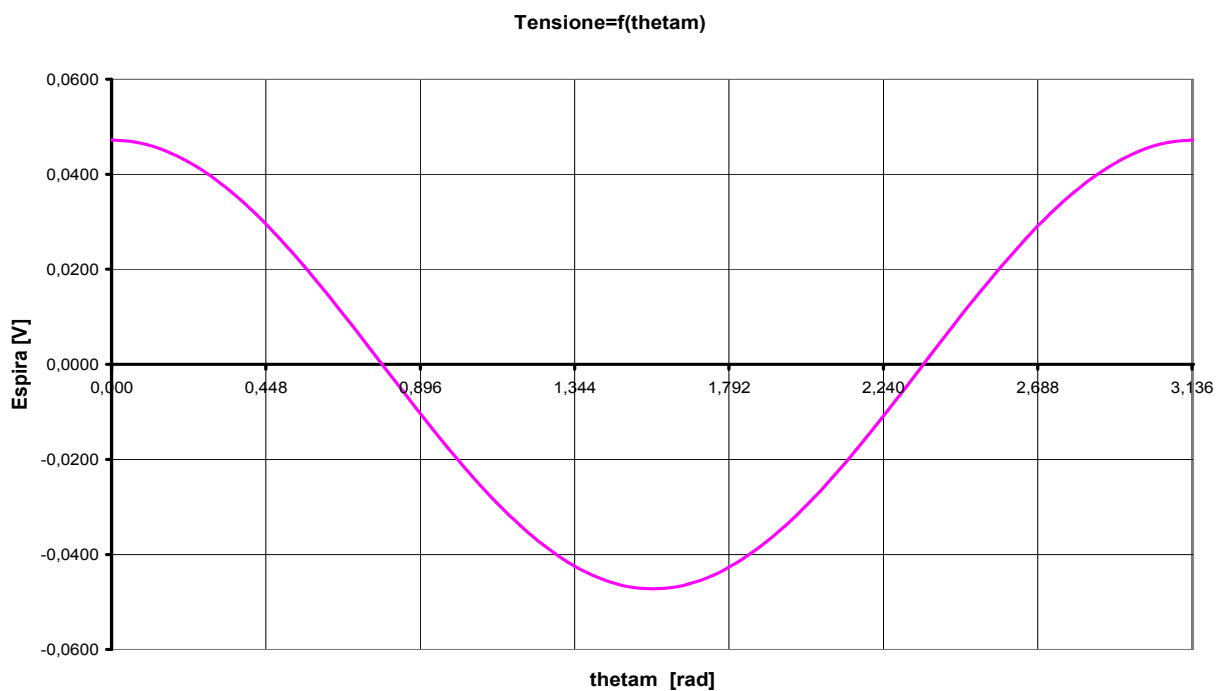
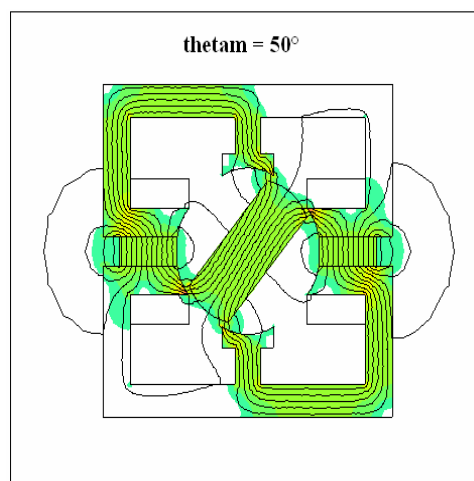
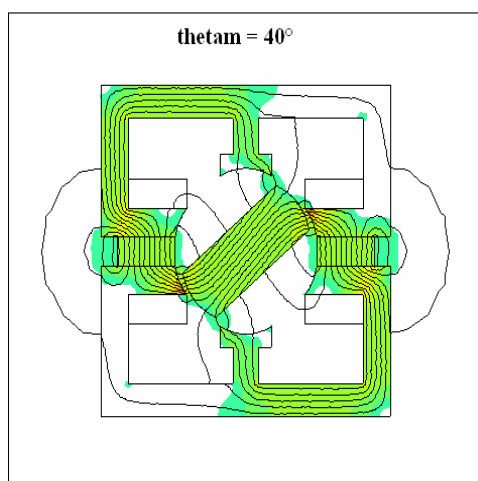
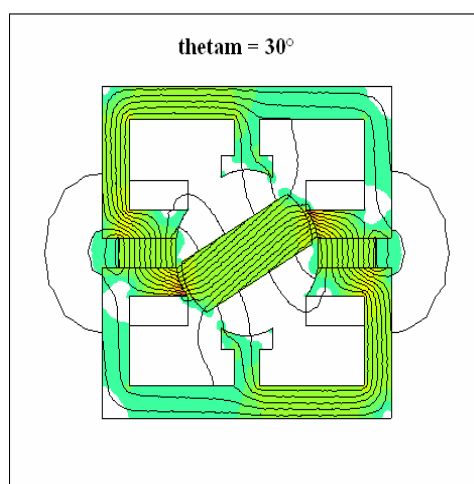
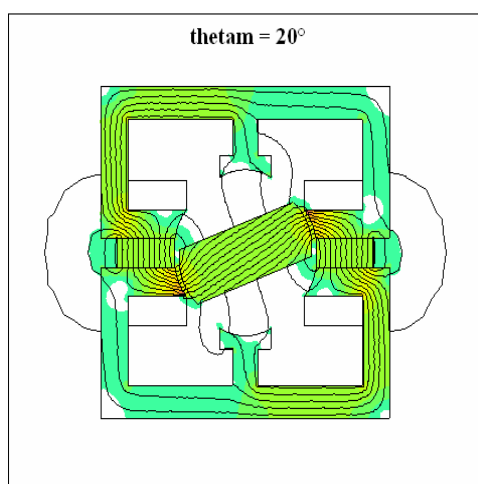
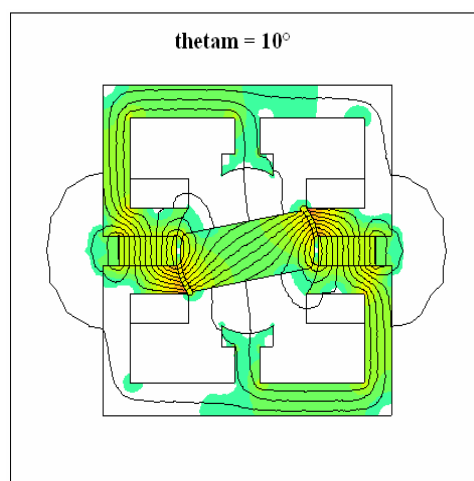
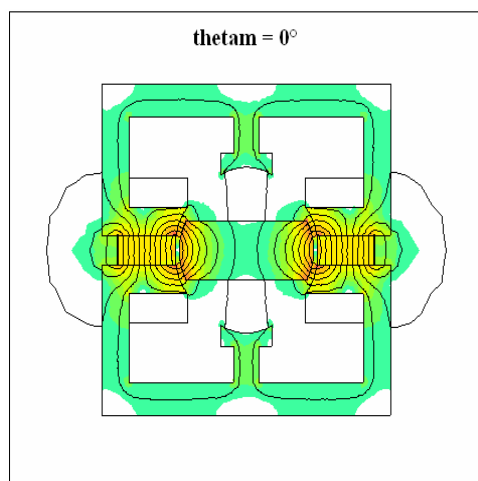
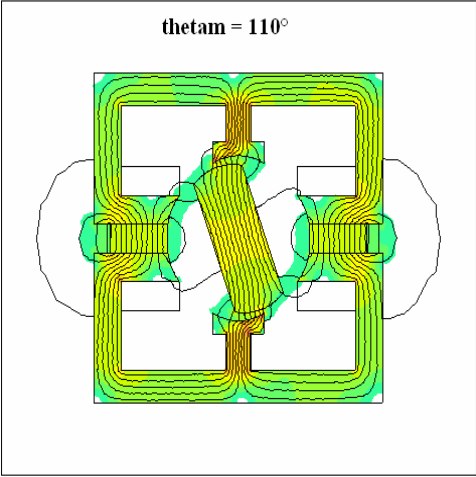
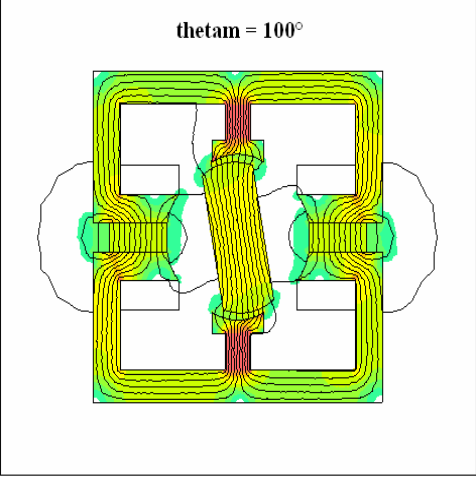
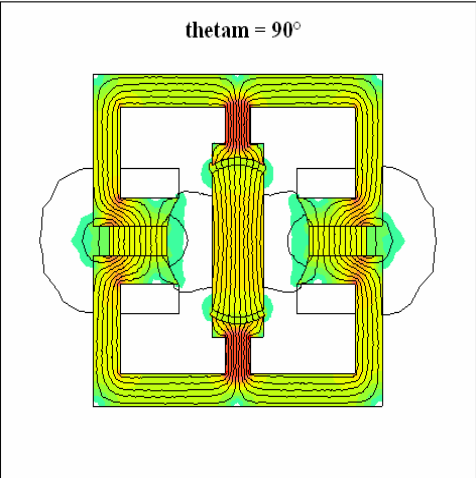
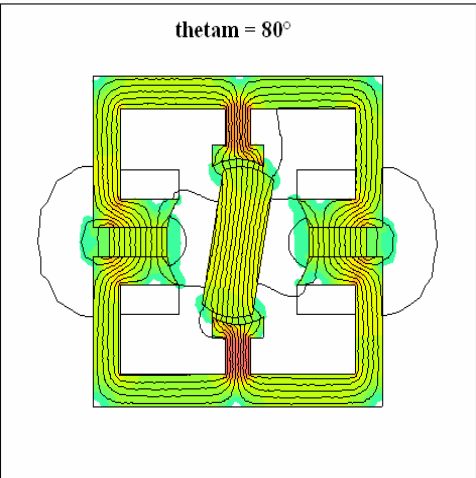
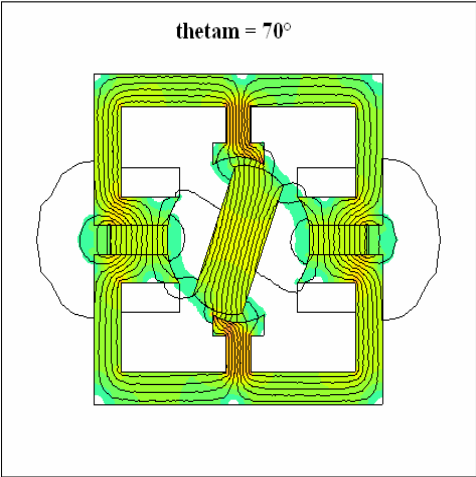
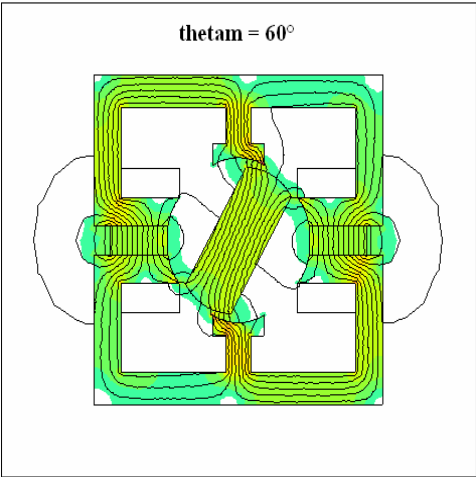
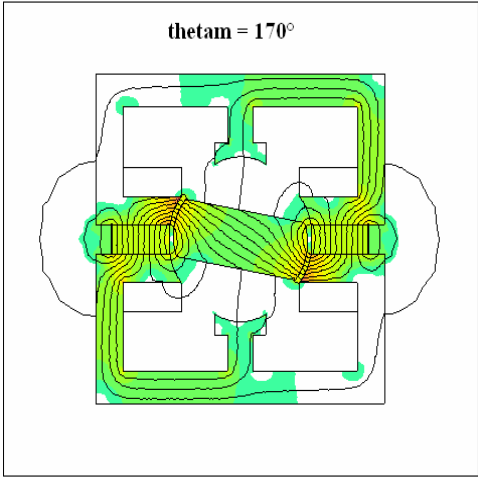
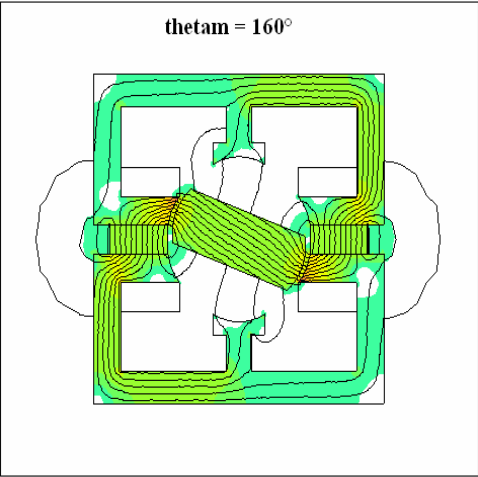
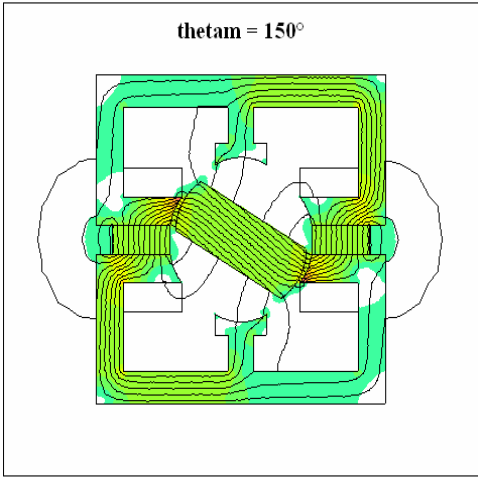
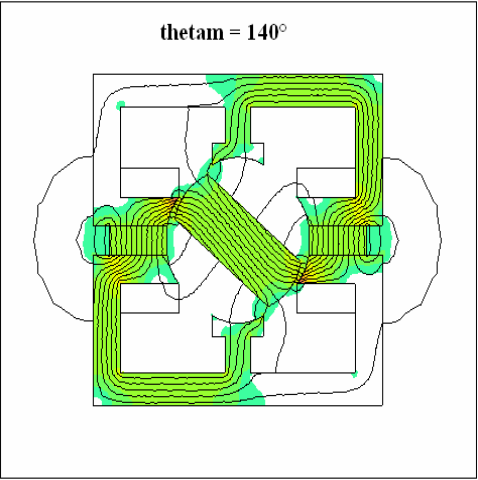
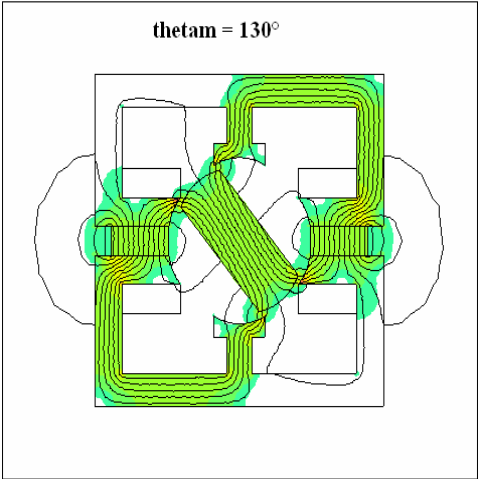
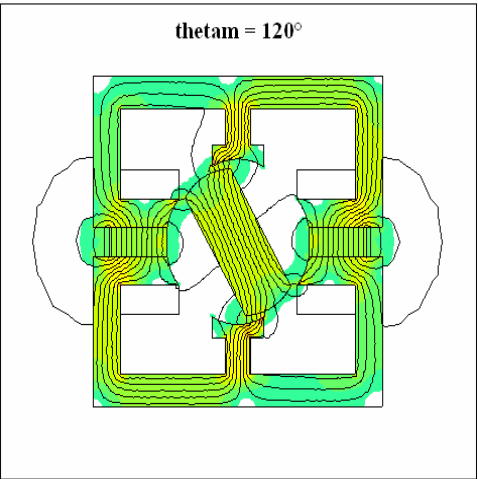


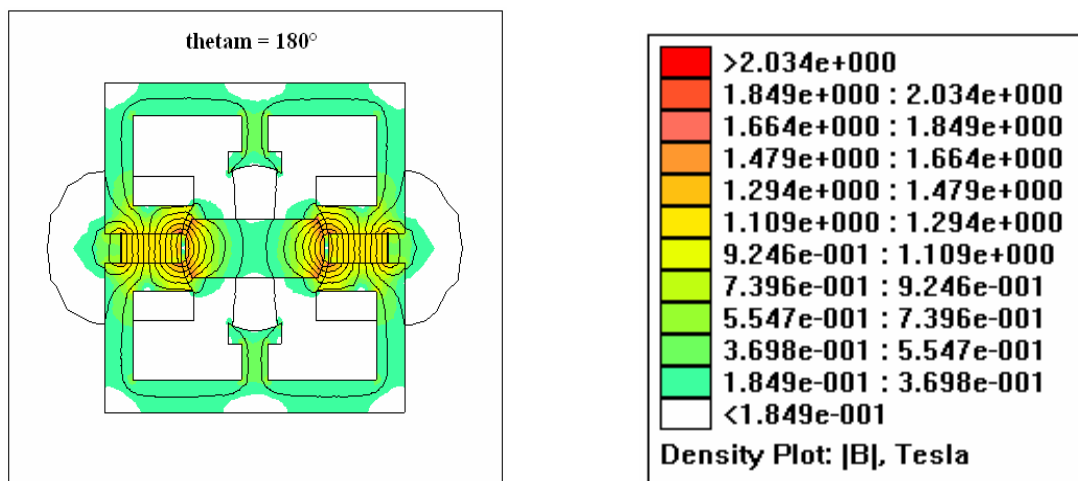
Fig. 2.47: Tensione indotta nella bobina di statore del modello 2

ANALISI A VUOTO AL VARIARE DI θ_m :









2.2.3 Simulazione del modello a carico

Si supponga ora di connettere l'avvolgimento di statore ad un carico elettrico, che per semplicità si ipotizza puramente resistivo; verrà così generata una corrente descritta dalla relazione:

$$i(\theta_m) = \frac{e(\theta_m)}{R}$$

Tale corrente origina una forza magnetomotrice e come è già stato dimostrato nel paragrafo 2.1.5 essa sarà descritta da un'equazione del tipo:

$$m(\theta_m) = -M \cos(2p\theta_m)$$

Nella quale il valore massimo M è dato dal prodotto tra il numero di spire n_c della bobina ed il valore massimo della corrente che la percorre. Per analizzare il comportamento a carico del secondo modello di microturbina progettato è stata assegnata alla forza magnetomotrice messa in gioco il seguente valore massimo:

$$M = 815 \text{ [A]}$$

Al fine di determinare la distribuzione del campo \dot{B} e la conformazione delle linee di flusso nel modello funzionante a carico è stata eseguita la simulazione mediante software FEMM; il risultato della simulazione viene riportato nella figura sottostante:

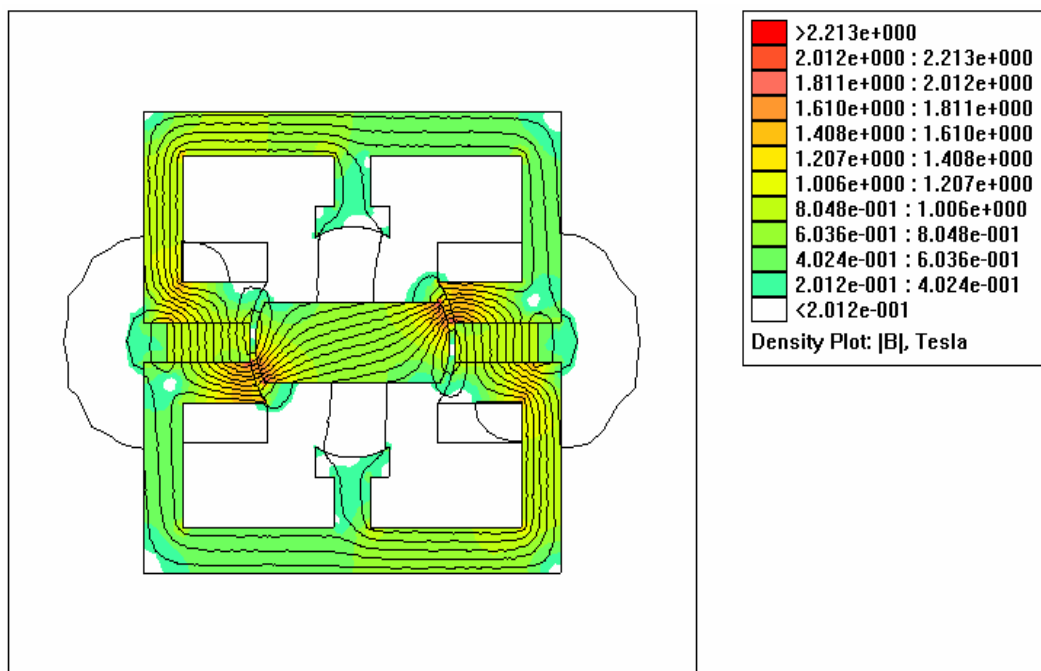


Fig. 2.48: Simulazione a carico del modello 2 di microturbina

Come si può osservare dalla Fig.2.48 le regioni ad alta densità di campo arrivano a valori di $|\dot{B}|$ prossimi ai 2.21 [T], quindi di molto superiori ai corrispondenti valori di campo di induzione magnetica ottenuti dalla simulazione a vuoto. Si osserva inoltre che la conformazione delle linee di flusso appare distorta rispetto alla Fig.2.38 rappresentante il modello funzionante a vuoto, a causa del campo indotto generato dalla corrente che percorre la bobina, il quale risulta ortogonale al flusso principale prodotto dai magneti.

Si procede ora ad analizzare i valori di $|\dot{B}|$ e $|\dot{H}|$ e del potenziale vettore magnetico al traferro, al fine di eseguire un confronto con i grafici precedentemente ottenuti dalla simulazione del primo modello.

Potenziale vettore magnetico

Viene di seguito riportato il valore del modulo del potenziale vettore magnetico (che nel caso bidimensionale si riduce alla sola componente A_z) al variare della lunghezza del traferro:

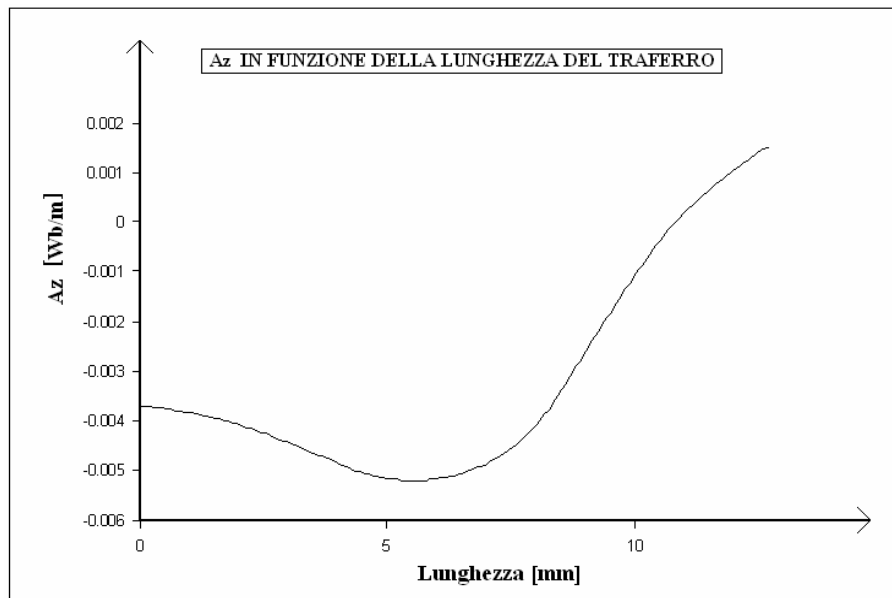


Fig. 2.49: Potenziale vettore magnetico A_z al traferro a carico (modello 2)

Campo di induzione magnetica

Viene qui sotto riportato il grafico del modulo del campo di induzione magnetica lungo il traferro, in modo tale da poterne eseguire un confronto con il corrispondente grafico di Fig.2.24 relativo al primo modello a carico:

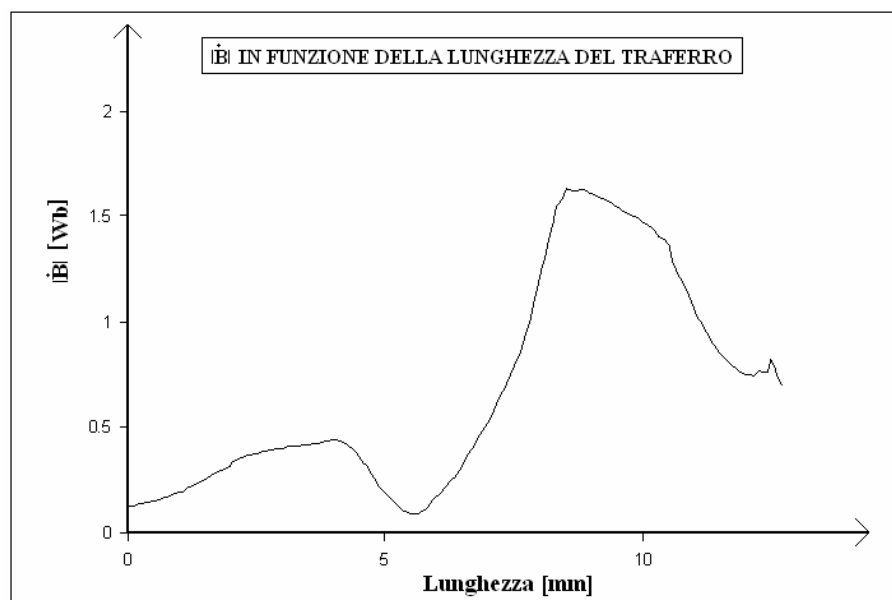


Fig. 2.50: $|B|$ in funzione della lunghezza del traferro a carico (modello 2)

Confrontando la figura sopra riportata con la corrispondente Fig.2.25 nella quale vengono riportati i valori di $|B|$ a carico del primo modello si nota una certa somiglianza tra le forme d' onda, anche se in Fig.2.50 si raggiungono valori di campo maggiori.

Campo magnetico

Viene di seguito riportato il modulo del campo magnetico \dot{H} in funzione della lunghezza del traferro, considerando il rotore fissato nella posizione iniziale corrispondente a $\theta_m = 0$, così come raffigurato in Fig. 2.38. Il grafico ottenuto presenta esattamente lo stesso andamento del modulo del campo di induzione magnetica \dot{B} , poichè come sappiamo la riluttanza μ_0 dell'aria al traferro è costante.

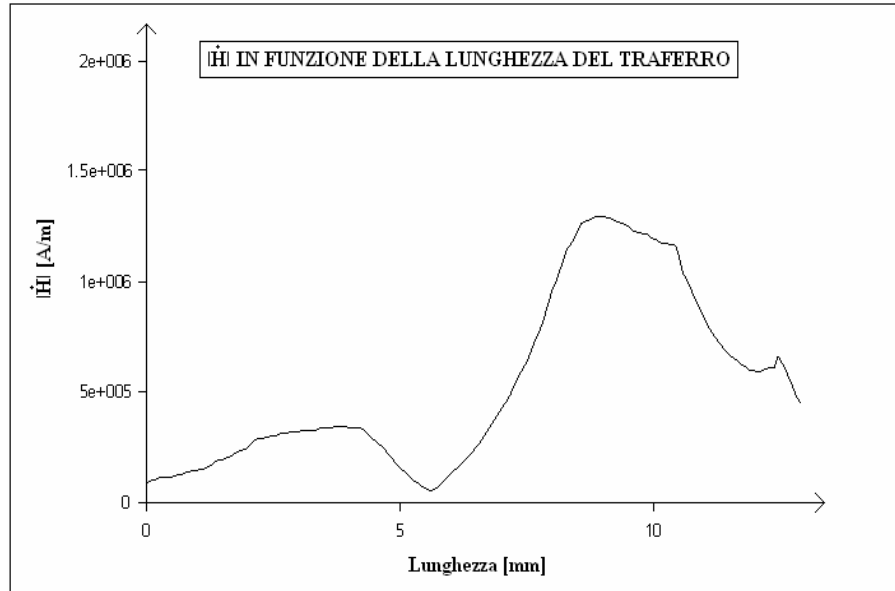


Fig. 2.51: $|\dot{H}|$ in funzione della lunghezza del traferro a carico (modello 2)

Flusso concatenato

Si riporta qui di seguito il valore del flusso concatenato con l'avvolgimento di statore stimato con FEMM mediante l'applicazione della formula (2.43) applicata al caso bidimensionale.

Il valore ottenuto è risultato pari a:

$$\Phi_c = -1.21 \cdot 10^{-4} \text{ [Wb]}$$

Il quale è risultato ben più alto rispetto al corrispondente valore ottenuto dal modello funzionante a vuoto, a causa del flusso indotto generato dalla corrente che percorre l'avvolgimento di statore.

Coppia

Si procede ora alla stima della coppia agente sul rotore mediante l'applicazione del metodo del tensore degli sforzi di Maxwell, attivabile mediante l'istruzione *Torque via Weighted stress tensor* dopo aver selezionato la superficie del rotore. Il valore di coppia ottenuta a carico è risultato pari a:

$$T = 153 \text{ [mNm]}$$

Il risultato fornito dal software FEMM è maggiore rispetto alla coppia a carico ottenuta nel precedente modello di microturbina, questo dimostra che a parità di forza magneto motrice in gioco l'introduzione dei due poli di statore porta ad un conseguente incremento della coppia agente sul rotore.

Energia e Coenergia magnetica

L'energia e la coenergia magnetica messe in gioco nel volume totale complessivamente occupato dal modello di macchina progettato sono risultate rispettivamente pari a:

$$W_m = 0.3045 \text{ [J]}$$

$$W_c = 0.3064 \text{ [J]}$$

Valori tra loro molto prossimi, a testimoniare la presenza di un circuito magnetico complessivamente lineare. Entrambi risultano sensibilmente più elevati rispetto ai valori di energia e coenergia ottenuti nel precedente modello a carico, questo dimostra che l'aggiunta delle sporgenze sullo statore incrementa l'energia messa in gioco, poichè aumenta il volume del ferro attraversato dal flusso.

Analisi ricorsiva mediante script LUA

Esattamente come nel precedente modello ci si pone ora l'obiettivo di studiare il comportamento del generatore durante la rotazione del rotore, in particolare analizzando i grafici relativi al flusso concatenato, coppia, forza elettromotrice indotta, energia e coenergia magnetica per diversi valori dell'angolo θ_m . A tal fine si impiega il medesimo script LUA precedentemente descritto; i risultati ottenuti vengono esposti nella tabella (2.10) della pagina successiva.

Tabella 2.10: Risultati dall' analisi a carico del modello 2

Thetam [°]	Flusso [Wb]	Fmm [A]	Tensione [V]	T [Nm]	Energia [J]	Coenergia [J]
0	-1,21E-04	-814,464	9,23E-02	1,53E-01	0,3045	0,3064
0,070	-1,43E-04	-806,538	7,80E-02	1,43E-01	0,3124	0,3163
0,140	-1,56E-04	-782,913	6,21E-02	1,07E-01	0,3160	0,3233
0,209	-1,63E-04	-744,050	4,50E-02	6,54E-02	0,3157	0,3262
0,279	-1,64E-04	-690,705	2,70E-02	3,66E-02	0,3133	0,3252
0,349	-1,62E-04	-623,916	8,53E-03	1,72E-02	0,3096	0,3214
0,419	-1,55E-04	-544,983	-1,01E-02	4,37E-03	0,3052	0,3159
0,489	-1,45E-04	-455,442	-2,86E-02	-1,26E-02	0,2997	0,3086
0,558	-1,32E-04	-357,038	-4,65E-02	-2,67E-02	0,2937	0,3006
0,628	-1,15E-04	-251,683	-6,35E-02	-3,78E-02	0,2867	0,2918
0,698	-9,50E-05	-141,430	-7,93E-02	-3,30E-02	0,2801	0,2836
0,768	-7,45E-05	-28,424	-9,35E-02	-2,02E-02	0,2746	0,2768
0,838	-5,40E-05	85,135	-1,06E-01	4,82E-05	0,2709	0,2723
0,907	-3,47E-05	197,037	-1,16E-01	1,12E-02	0,2693	0,2703
0,977	-1,76E-05	305,104	-1,24E-01	2,63E-02	0,2691	0,2700
1,047	-4,21E-06	407,232	-1,30E-01	4,00E-02	0,2706	0,2717
1,117	5,68E-06	501,434	-1,33E-01	4,59E-02	0,2734	0,2747
1,187	1,32E-05	585,876	-1,34E-01	4,68E-02	0,2765	0,2782
1,256	1,92E-05	658,915	-1,32E-01	4,42E-02	0,2802	0,2824
1,326	2,40E-05	719,129	-1,27E-01	4,16E-02	0,2830	0,2858
1,396	2,81E-05	765,346	-1,20E-01	3,80E-02	0,2858	0,2894
1,466	3,14E-05	796,666	-1,10E-01	3,13E-02	0,2878	0,2921
1,536	3,43E-05	812,480	-9,89E-02	2,11E-02	0,2894	0,2943
1,605	3,67E-05	812,480	-8,54E-02	6,97E-03	0,2903	0,2953
1,675	3,87E-05	796,666	-7,03E-02	-3,86E-03	0,2904	0,2950
1,745	4,03E-05	765,346	-5,37E-02	-9,31E-03	0,2900	0,2940
1,815	4,17E-05	719,129	-3,62E-02	-1,19E-02	0,2889	0,2922
1,885	4,30E-05	658,915	-1,79E-02	-1,31E-02	0,2874	0,2901
1,954	4,44E-05	585,876	7,21E-04	-1,09E-02	0,2854	0,2876
2,024	4,65E-05	501,434	1,93E-02	-6,44E-03	0,2830	0,2850
2,094	4,97E-05	407,232	3,76E-02	5,81E-03	0,2811	0,2829
2,164	5,49E-05	305,104	5,51E-02	2,18E-02	0,2793	0,2811
2,234	6,11E-05	197,037	7,15E-02	2,20E-02	0,2776	0,2797
2,303	6,65E-05	85,135	8,65E-02	1,63E-02	0,2755	0,2776
2,373	6,99E-05	-28,424	9,99E-02	1,51E-02	0,2729	0,2748
2,443	7,07E-05	-141,430	1,11E-01	1,28E-02	0,2703	0,2718
2,513	6,81E-05	-251,683	1,21E-01	1,09E-02	0,2675	0,2687
2,583	6,16E-05	-357,038	1,27E-01	4,95E-03	0,2648	0,2657
2,652	5,10E-05	-455,442	1,32E-01	7,84E-03	0,2627	0,2632
2,722	3,64E-05	-544,983	1,34E-01	2,00E-02	0,2619	0,2622
2,792	1,78E-05	-623,916	1,33E-01	4,39E-02	0,2631	0,2633
2,862	-5,23E-06	-690,705	1,30E-01	7,77E-02	0,2671	0,2672
2,932	-3,29E-05	-744,050	1,24E-01	1,15E-01	0,2745	0,2746
3,001	-6,37E-05	-782,913	1,16E-01	1,38E-01	0,2838	0,2842
3,071	-9,41E-05	-806,538	1,05E-01	1,51E-01	0,2945	0,2954
3,141	-1,21E-04	-814,464	9,25E-02	1,52E-01	0,3045	0,3064

Grafico del flusso concatenato

Viene qui sotto riportato il grafico del flusso concatenato con l'avvolgimento di statore in funzione della posizione angolare del rotore descritta dall'angolo meccanico θ_m . Rispetto al funzionamento a vuoto tale flusso presenta sia la componente generata dai magneti permanenti di statore (flusso principale) sia la componente generata dalla corrente indotta che attraversa gli avvolgimenti (flusso indotto).

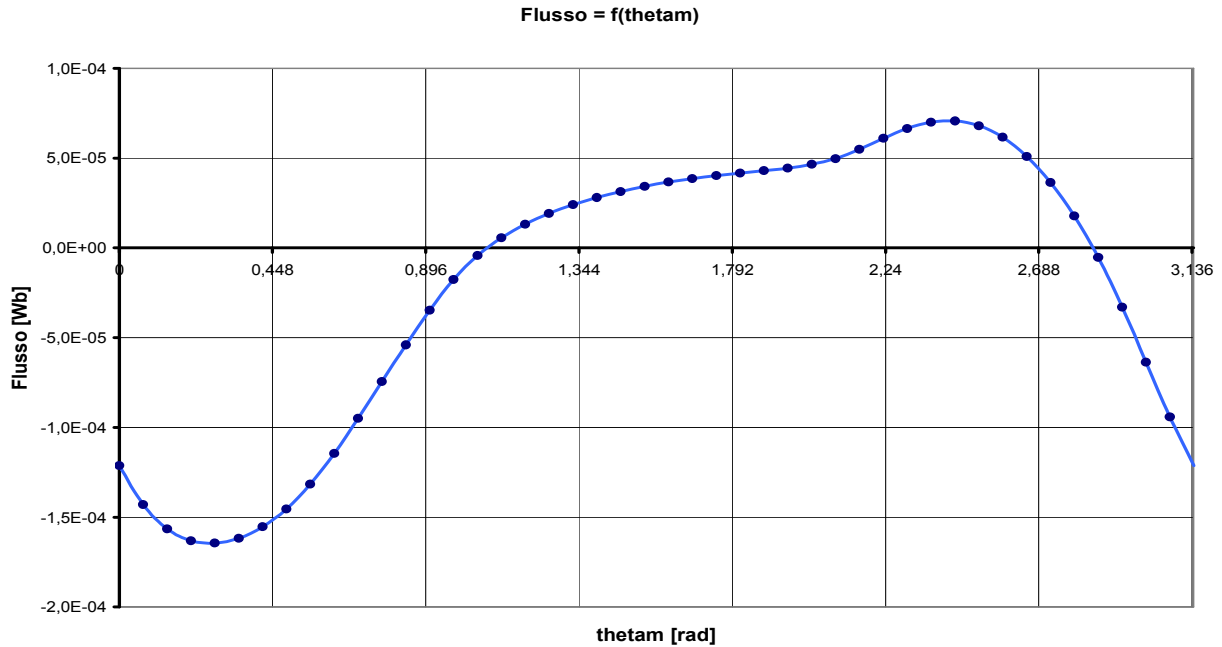


Fig. 2.52: Flusso concatenato in funzione di θ_m (modello 2 a carico)

Grafico della forza magnetomotrice

Allo scopo di analizzare il comportamento a carico del secondo modello di microturbina progettato si è ipotizzata la presenza di una corrente negli avvolgimenti di statore tale da generare una forza magnetomotrice alternata di ampiezza pari a 815 [A]. La sua rappresentazione grafica in funzione dell'angolo meccanico θ_m viene riportata nella sottostante figura (2.53):

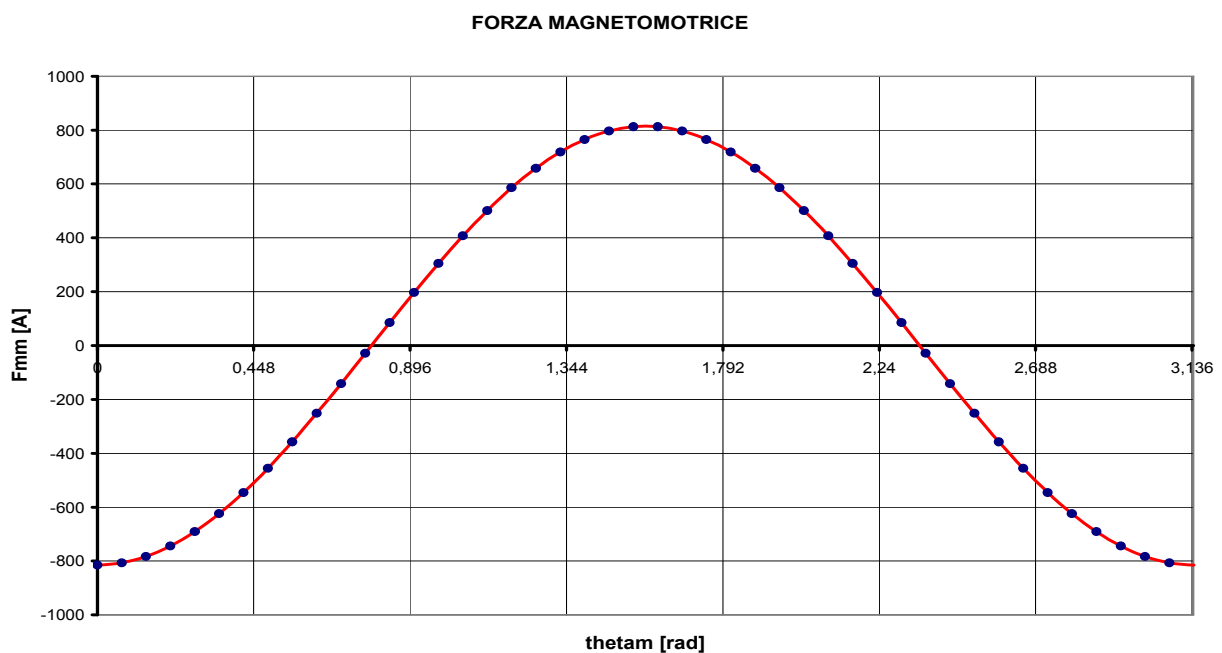


Fig. 2.53: Forza magnetomotrice in funzione di θ_m (modello 2 a carico)

Coppia

Grazie al software FEMM è possibile stimare la coppia agente sul rotore dalla sola conoscenza dei campi \vec{B} ed \vec{H} presenti al traferro attivando l'opzione *Torque via Weighted stress tensor*. Il grafico della coppia presente in funzione dell'angolo meccanico θ_m viene qui di seguito riportata in figura (2.54):

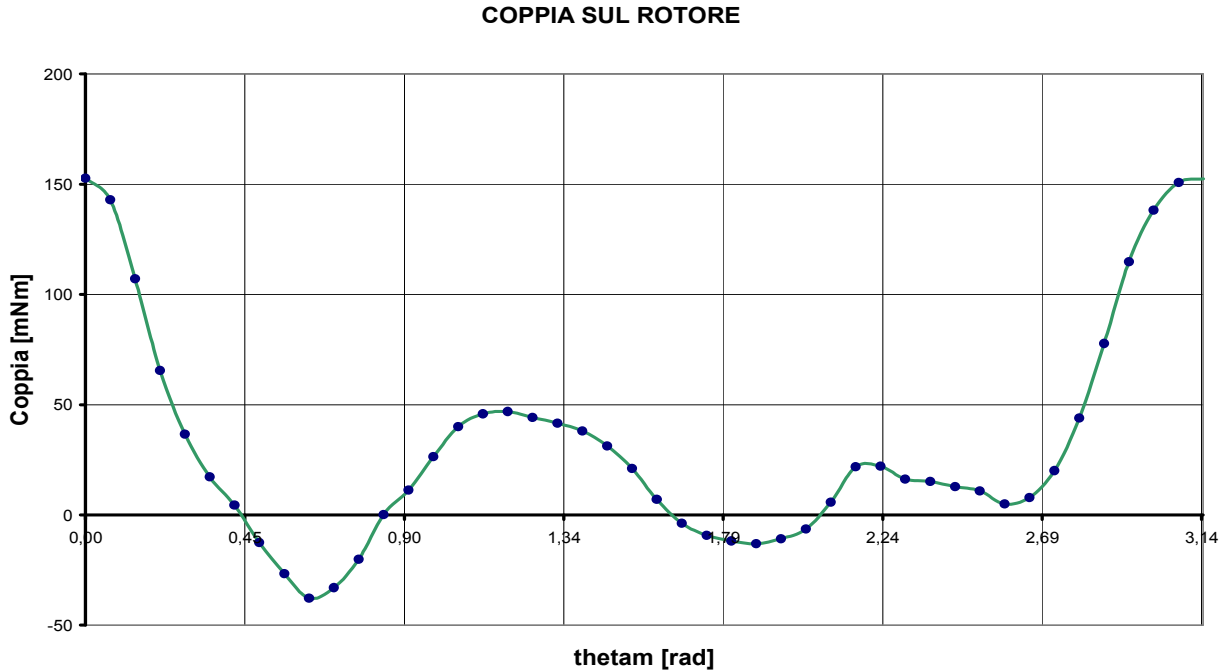


Fig. 2.54: Coppia sul rotore in funzione di θ_m (modello 2 a carico)

Energia magnetica

Di particolare interesse risulta l'andamento dell'energia magnetica complessivamente messa in gioco nel modello di generatore progettato funzionante a carico, se ne riporta pertanto nella sottostante figura (2.55) l'andamento grafico in funzione della posizione angolare del rotore θ_m :

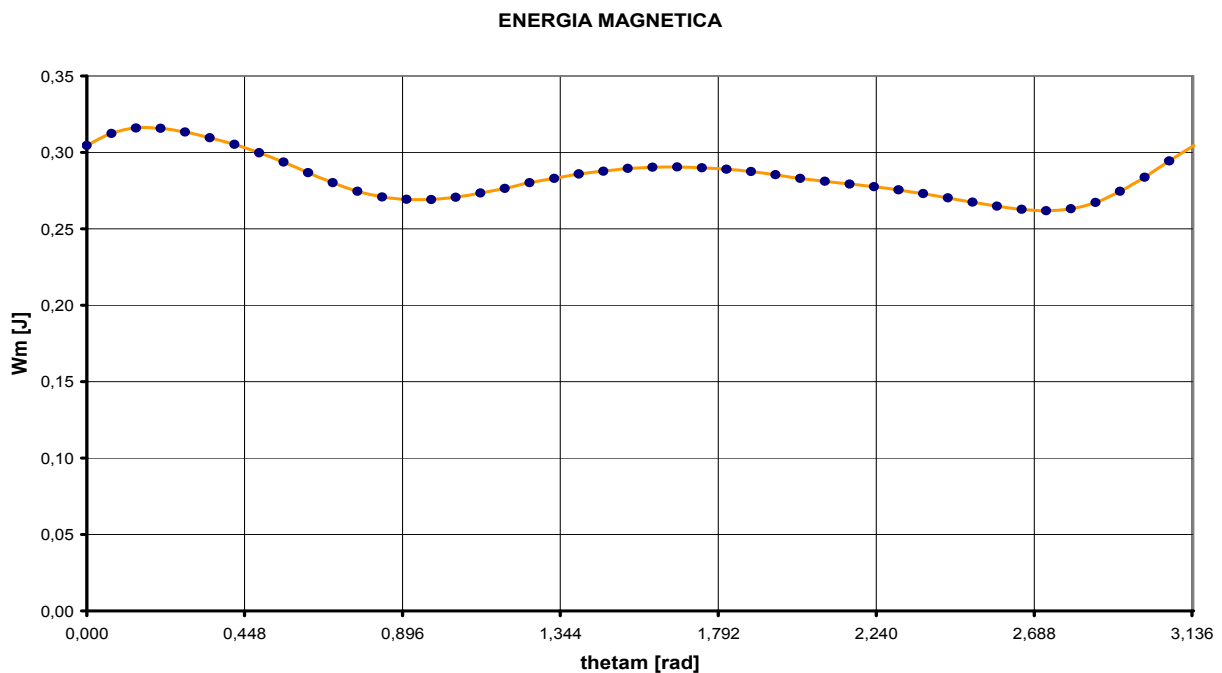


Fig. 2.55: Energia magnetica in funzione di θ_m (modello 2 a carico)

Coenergia magnetica

Al fine di analizzare il comportamento del modello di generatore progettato da un punto di vista prettamente energetico è necessario conoscere anche la grandezza duale dell'energia, ovvero la coenergia magnetica. Pertanto si riporta nella seguente figura il suo andamento grafico in funzione dell'angolo meccanico θ_m :

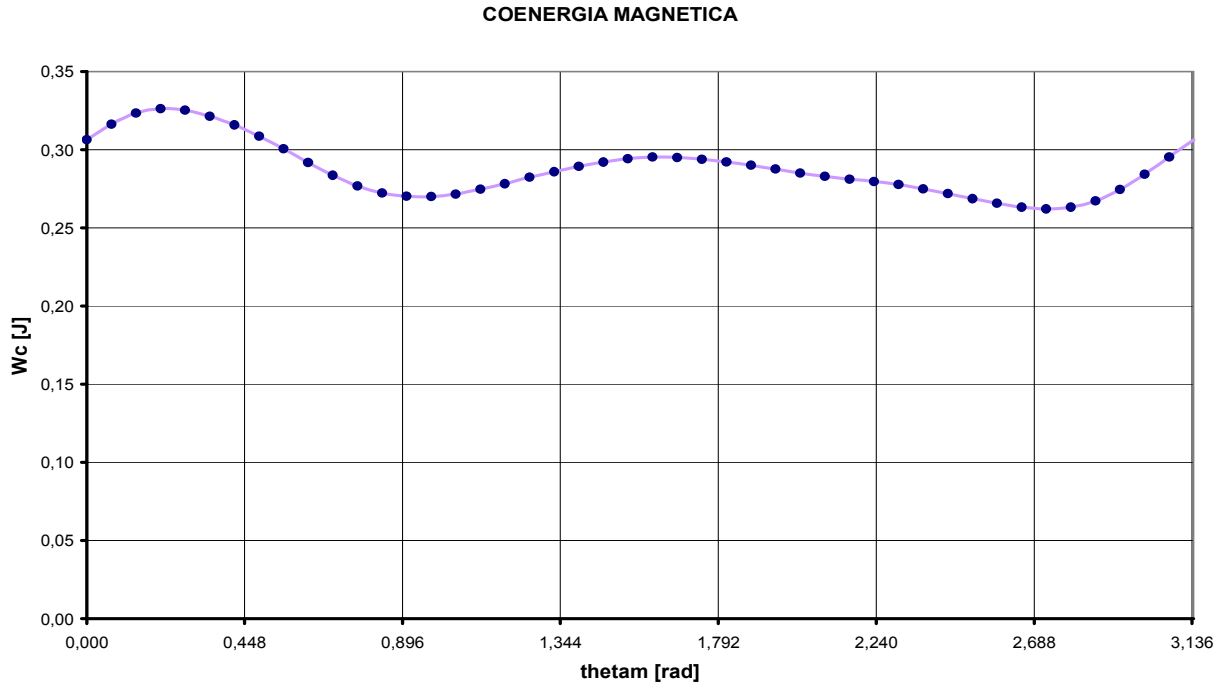


Fig. 2.56: Coenergia magnetica in funzione di θ_m (modello 2 a carico)

Forza elettromotrice indotta

Si procede ora all'analisi della grandezza elettrica di maggior interesse per un generatore, ovvero la forza elettromotrice in grado di produrre. Al fine di stimare la tensione indotta $e(\theta_m)$ sulle bobine di statore si è proceduto alla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$, in modo tale da determinarne l'ampiezza della prima armonica. Grazie allo script realizzato in codice MATLAB precedentemente descritto, sono stati calcolati valore efficace e fase delle prime sei armoniche del flusso concatenato, i cui risultati vengono riportati nella tabella sottostante:

Tabella 2.11: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ a carico

ARMONICA	ak [Wb]	bk [Wb]	Fk [Wb]	Øk [rad]
1	-7,70E-05	-7,35E-05	7,53E-05	-0,762
2	-2,59E-05	-3,96E-05	3,35E-05	-0,991
3	-1,02E-05	-5,47E-06	8,17E-06	-0,494
4	-7,19E-06	1,09E-06	5,14E-06	0,151
5	-7,05E-06	-1,26E-06	5,06E-06	-0,177
6	-6,27E-06	-5,80E-07	4,45E-06	-0,092

$$F_0 = -2.22 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$F = 8.61 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$F_{dis} = 4.18 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

$$THD = 55.57 \%$$

Vengono riportati nella sottostante tabella i valori delle prime sei armoniche nelle quali è stato scomposto il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$, considerando il generatore funzionante a carico:

Tabella 2.12: Scomposizione in serie di Fourier di $\Phi_c(\theta_m)$ (modello a carico)

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Y1 [Wb]	Y2 [Wb]	Y3 [Wb]	Y4 [Wb]	Y5 [Wb]	Y6 [Wb]	Fo [Wb]
0	-1,21E-04	-7,70E-05	-2,59E-05	-1,02E-05	-7,19E-06	-7,05E-06	-6,27E-06	-2,22E-05
0,070	-1,43E-04	-8,65E-05	-3,58E-05	-1,15E-05	-5,52E-06	-6,21E-06	-4,63E-06	-2,22E-05
0,140	-1,56E-04	-9,43E-05	-4,30E-05	-1,09E-05	-2,17E-06	-2,47E-06	7,66E-08	-2,22E-05
0,209	-1,63E-04	-1,00E-04	-4,68E-05	-8,35E-06	1,83E-06	2,43E-06	4,73E-06	-2,22E-05
0,279	-1,64E-04	-1,04E-04	-4,69E-05	-4,38E-06	5,28E-06	6,19E-06	6,25E-06	-2,22E-05
0,349	-1,62E-04	-1,06E-04	-4,35E-05	3,43E-07	7,13E-06	7,06E-06	3,64E-06	-2,22E-05
0,419	-1,55E-04	-1,06E-04	-3,67E-05	5,01E-06	6,81E-06	4,62E-06	-1,38E-06	-2,22E-05
0,489	-1,45E-04	-1,04E-04	-2,70E-05	8,81E-06	4,42E-06	2,32E-08	-5,49E-06	-2,22E-05
0,558	-1,32E-04	-9,98E-05	-1,52E-05	1,11E-05	6,88E-07	-4,58E-06	-5,97E-06	-2,22E-05
0,628	-1,15E-04	-9,37E-05	-2,31E-06	1,14E-05	-3,25E-06	-7,05E-06	-2,50E-06	-2,22E-05
0,698	-9,50E-05	-8,58E-05	1,08E-05	9,83E-06	-6,20E-06	-6,22E-06	2,62E-06	-2,22E-05
0,768	-7,45E-05	-7,61E-05	2,31E-05	6,51E-06	-7,27E-06	-2,47E-06	6,01E-06	-2,22E-05
0,838	-5,40E-05	-6,51E-05	3,36E-05	2,07E-06	-6,13E-06	2,42E-06	5,42E-06	-2,22E-05
0,907	-3,47E-05	-5,27E-05	4,15E-05	-2,73E-06	-3,13E-06	6,19E-06	1,24E-06	-2,22E-05
0,977	-1,76E-05	-3,93E-05	4,61E-05	-7,06E-06	8,28E-07	7,06E-06	-3,75E-06	-2,22E-05
1,047	-4,21E-06	-2,52E-05	4,72E-05	-1,02E-05	4,53E-06	4,63E-06	-6,27E-06	-2,22E-05
1,117	5,68E-06	-1,05E-05	4,47E-05	-1,15E-05	6,86E-06	3,17E-08	-4,64E-06	-2,22E-05
1,187	1,32E-05	4,32E-06	3,87E-05	-1,09E-05	7,10E-06	-4,58E-06	6,17E-08	-2,22E-05
1,256	1,92E-05	1,91E-05	2,97E-05	-8,36E-06	5,19E-06	-7,05E-06	4,72E-06	-2,22E-05
1,326	2,40E-05	3,35E-05	1,84E-05	-4,39E-06	1,70E-06	-6,22E-06	6,26E-06	-2,22E-05
1,396	2,81E-05	4,72E-05	5,63E-06	3,30E-07	-2,31E-06	-2,48E-06	3,65E-06	-2,22E-05
1,466	3,14E-05	6,00E-05	-7,54E-06	5,00E-06	-5,61E-06	2,42E-06	-1,37E-06	-2,22E-05
1,536	3,43E-05	7,17E-05	-2,01E-05	8,80E-06	-7,21E-06	6,18E-06	-5,48E-06	-2,22E-05
1,605	3,67E-05	8,19E-05	-3,11E-05	1,11E-05	-6,62E-06	7,06E-06	-5,97E-06	-2,22E-05
1,675	3,87E-05	9,06E-05	-3,98E-05	1,14E-05	-4,02E-06	4,63E-06	-2,51E-06	-2,22E-05
1,745	4,03E-05	9,75E-05	-4,53E-05	9,83E-06	-1,94E-07	4,02E-08	2,61E-06	-2,22E-05
1,815	4,17E-05	1,02E-04	-4,73E-05	6,52E-06	3,69E-06	-4,57E-06	6,00E-06	-2,22E-05
1,885	4,30E-05	1,05E-04	-4,57E-05	2,08E-06	6,45E-06	-7,05E-06	5,43E-06	-2,22E-05
1,954	4,44E-05	1,06E-04	-4,05E-05	-2,72E-06	7,25E-06	-6,22E-06	1,26E-06	-2,22E-05
2,024	4,65E-05	1,05E-04	-3,22E-05	-7,04E-06	5,85E-06	-2,49E-06	-3,74E-06	-2,22E-05
2,094	4,97E-05	1,02E-04	-2,14E-05	-1,02E-05	2,67E-06	2,41E-06	-6,27E-06	-2,22E-05
2,164	5,49E-05	9,70E-05	-8,92E-06	-1,15E-05	-1,32E-06	6,18E-06	-4,65E-06	-2,22E-05
2,234	6,11E-05	9,00E-05	4,23E-06	-1,09E-05	-4,91E-06	7,06E-06	4,67E-08	-2,22E-05
2,303	6,65E-05	8,12E-05	1,71E-05	-8,37E-06	-7,00E-06	4,64E-06	4,71E-06	-2,22E-05
2,373	6,99E-05	7,08E-05	2,86E-05	-4,41E-06	-6,98E-06	4,87E-08	6,26E-06	-2,22E-05
2,443	7,07E-05	5,91E-05	3,79E-05	3,16E-07	-4,83E-06	-4,57E-06	3,67E-06	-2,22E-05
2,513	6,81E-05	4,62E-05	4,42E-05	4,98E-06	-1,21E-06	-7,04E-06	-1,35E-06	-2,22E-05
2,583	6,16E-05	3,24E-05	4,71E-05	8,79E-06	2,77E-06	-6,23E-06	-5,47E-06	-2,22E-05
2,652	5,10E-05	1,79E-05	4,64E-05	1,11E-05	5,91E-06	-2,50E-06	-5,98E-06	-2,22E-05
2,722	3,64E-05	3,17E-06	4,21E-05	1,14E-05	7,26E-06	2,40E-06	-2,52E-06	-2,22E-05
2,792	1,78E-05	-1,17E-05	3,45E-05	9,84E-06	6,40E-06	6,17E-06	2,60E-06	-2,22E-05
2,862	-5,23E-06	-2,63E-05	2,43E-05	6,53E-06	3,60E-06	7,06E-06	6,00E-06	-2,22E-05
2,932	-3,29E-05	-4,04E-05	1,22E-05	2,10E-06	-3,00E-07	4,65E-06	5,43E-06	-2,22E-05
3,001	-6,37E-05	-5,37E-05	-9,09E-07	-2,70E-06	-4,10E-06	5,72E-08	1,27E-06	-2,22E-05
3,071	-9,41E-05	-6,60E-05	-1,39E-05	-7,03E-06	-6,66E-06	-4,56E-06	-3,73E-06	-2,22E-05
3,141	-1,21E-04	-7,69E-05	-2,58E-05	-1,02E-05	-7,20E-06	-7,04E-06	-6,27E-06	-2,22E-05

Si riportano nella sottostante figura l'andamento delle prime sei armoniche nelle quali è stato scomposto il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$, in funzione dell'angolo meccanico θ_m .

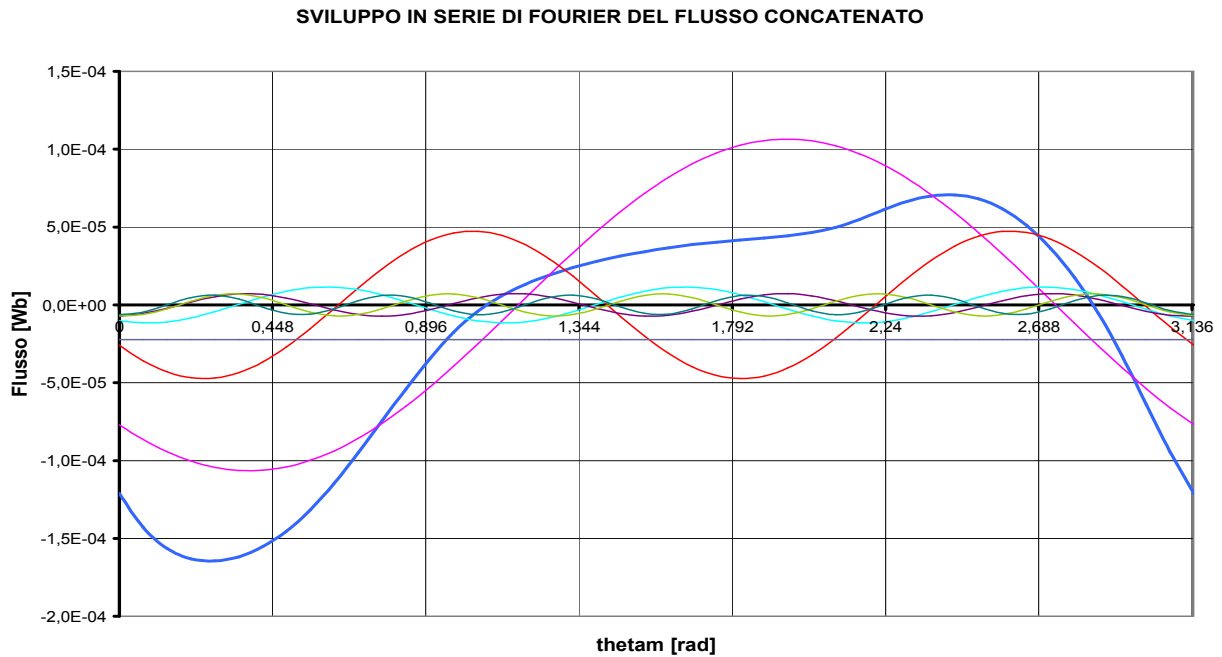


Fig. 2.57: Scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ (modello 2 a carico)

Grazie alla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato è stato possibile ricostruire la forma d'onda della forza elettromotrice indotta $e(\theta_m)$, la quale in virtù della (2.15) risulta pari a:

$$\lambda_1(\theta_m) = a_1 \cos(2p\theta_m) + b_1 \sin(2p\theta_m)$$

I coefficienti a_1 e b_1 caratteristici della prima armonica vengono determinati in automatico dallo script in codice MATLAB, in aggiunta al valore efficace e l'angolo di fase.

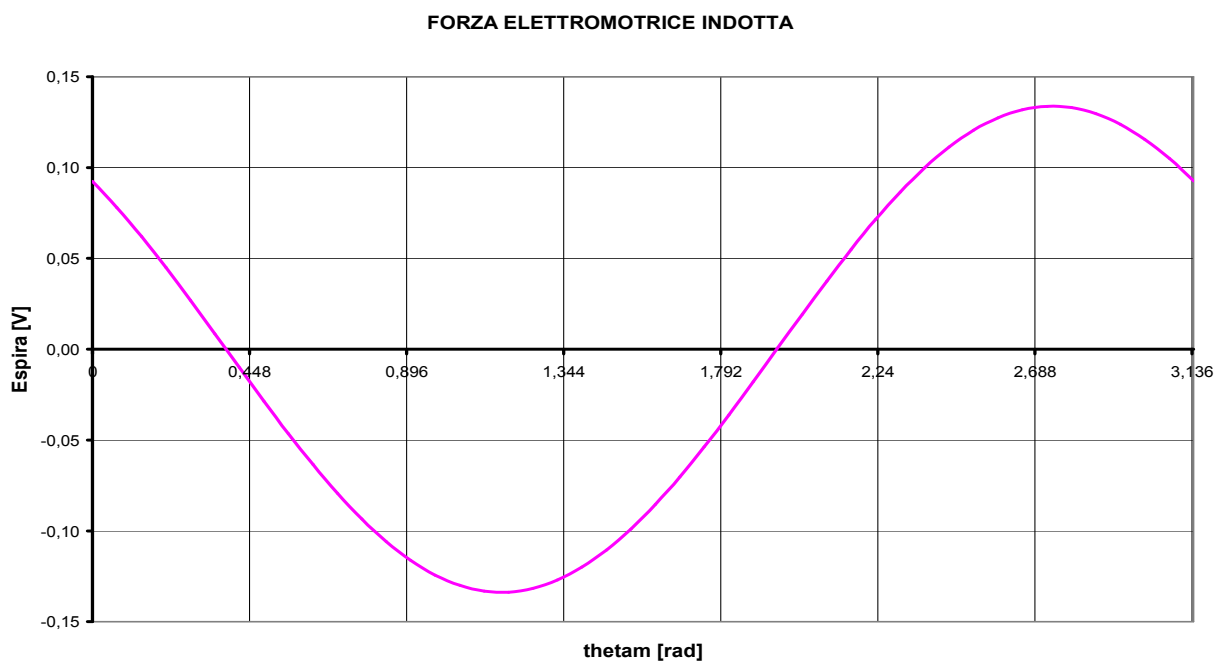


Fig. 2.58: Forza elettromotrice indotta nella bobina di statore (modello 2 a carico)

Dalla precedente figura (2.58) si ricava il valore massimo della forza elettromotrice indotta per spira, la quale è risultata pari a:

$$E_{max} = 0.134 \text{ [V/spira]}$$

Valore notevolmente superiore alla corrispondente tensione indotta presente nell' avvolgimento di statore nel funzionamento a vuoto.

2.2.4 Considerazioni sul modello progettato

Una volta analizzato il modello progettato tramite l' ausilio del software di simulazione FEMM è doveroso esprimere un' attenta valutazione sui risultati ottenuti, sia nel funzionamento a vuoto sia in quello a carico.

Dopo una accurata osservazione dei grafici del flusso concatenato, della coppia, della tensione indotta, dell' energia e della coenergia magnetica ottenute in funzione della posizione angolare del rotore θ_m sarà possibile stabilire se il modello di microturbina proposto presenta o meno caratteristiche prossime a quelle ideali prefissate, in modo tale da procedere eventualmente alla sua costruzione.

Valutazione della configurazione di campo \dot{B}

Osservando con attenzione la simulazione del modello a vuoto proposta in Fig.2.38 si nota come la presenza di altri due poli salienti di statore agevoli notevolmente il flusso magnetico nel suo percorso di attraversamento del rotore, riducendo notevolmente il tratto in aria.

Questo comporta una riduzione della riluttanza complessivamente incontrata dal flusso, conseguente all' aumento del tratto ferromagnetico. Si possono fare analoghe considerazioni osservando la Fig.2.48 rappresentante il modello funzionante a carico, nella quale si nota con chiarezza come le salienze presenti sullo statore siano in grado di incanalare il flusso magnetico nella direzione voluta.

É intuitivo ipotizzare che l' aggiunta di altri due poli al rotore porterebbe ad una ulteriore riduzione del tratto in aria incontrato dal flusso nel suo percorso, realizzando in questo modo un generatore a 4 poli.

Valutazione del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$

Si procede ora alla valutazione della forma d' onda del flusso concatenato con l' avvolgimento di statore sia nel funzionamento a vuoto che in quello a carico del modello di microturbina proposto; in entrambi i casi la forma d' onda ottenuta dovrebbe risultare il più possibile prossima alla forma d' onda sinusoidale.

Funzionamento a vuoto

Il grafico del flusso concatenato in funzione dell' angolo meccanico θ_m è stato presentato in Fig.2.42, dalla quale è immediato ricavarne il valore massimo, risultato pari a:

$$\Lambda_c = 1.01 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

la quale è caratterizzata da periodo $2T = \pi$ [rad] rispetto alla posizione del rotore descritta da θ_m , e pulsazione ω_s proporzionale al numero di poli, secondo la relazione:

$$\omega_s = 2p \cdot \omega_m$$

L' introduzione dei poli salienti sullo statore ha portato dunque ad un significativo incremento del valore di flusso concatenato con l' avvolgimento, incremento corrispondente a $4 \cdot 10^{-5}$ [Wb].

Questo è certamente un aspetto positivo poichè maggiore è l' ampiezza del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ maggiore è l' ampiezza della tensione che il microgeneratore sarà in grado di produrre. Tuttavia il grafico del flusso in funzione dell' angolo meccanico θ_m appare ben lontano dalla forma d' onda sinusoidale, così come si può constatare osservandone lo sviluppo in serie di Fourier proposto in Fig.2.57.

Il contenuto armonico è davvero notevole, con presenza di armoniche sia pari sia dispari, e l' indice di distorsione armonica THD sfiora il 56%; conseguentemente la tensione generata dal modello di microturbina proposto presenta una forma d' onda notevolmente distorta e questo lo renderebbe pertanto un generatore elettrico di scarsa qualità.

Funzionamento a carico

Nella Fig.2.52 viene riportato l' andamento del flusso concatenato ipotizzando il generatore funzionante a carico a regime sinusoidale con avvolgimenti caratterizzati da una forza magnetomotrice di valore massimo pari a 815 [A].

Il valore massimo di flusso concatenato che si ottiene in queste condizioni di lavoro, secondo la simulazione eseguita con software FEMM, è risultato pari a:

$$\Lambda_c = 7.07 \cdot 10^{-5} \text{ [Wb]}$$

Rispetto al funzionamento a carico nelle medesime condizioni di lavoro del primo modello di microturbina inizialmente proposto il valore massimo di $\Phi_c(\theta_m)$ è incrementato di circa il doppio, grazie alla presenza delle salienze di statore che hanno aumentato il campo di induzione magnetica \vec{B} nelle zone in cui sono stati inseriti.

Tuttavia anche nel funzionamento a carico si nota una forma d' onda del flusso concatenato molto distorta, e ben lontana dalla forma sinusoidale ideale a cui si aspirava.

Valutazione della tensione indotta

In Fig.2.47 viene riportato il grafico della forza elettromotrice indotta negli avvolgimenti di statore del modello di microturbina progettato funzionante a vuoto, il cui valore massimo è risultato pari a:

$$E = 0.0472 \text{ [V]}$$

confrontando il suddetto valore con l' ampiezza della tensione indotta a vuoto del primo modello di generatore proposto si riscontra un aumento della forza elettromotrice indotta per spira di circa il doppio, questo grazie all' incremento del flusso concatenato ottenuto con l' introduzione delle salienze di statore.

Per quanto riguarda il funzionamento a carico, osservando la Fig.2.58 si riscontra un' ampiezza massima della tensione generata pari a:

$$E = 0.134 \text{ [V]}$$

notevolmente superiore ai 0.046 [V] ottenuti dall' analisi del primo modello nelle medesime condizioni di lavoro.

Valutazione della coppia sul rotore

Si considerino l' andamento della coppia funzionante a vuoto mostrata in Fig.2.43 ed il grafico della coppia funzionante a carico proposta in precedenza in Fig.2.54 relative al modello di microturbina progettato:

Funzionamento a vuoto

La coppia a vuoto presenta poche oscillazioni e piuttosto smorzate ed è caratterizzata da un valore medio pari a:

$$T_m = 0.25 \text{ [mNm]}$$

Mentre per quanto riguarda la massima oscillazione di coppia (intesa come la differenza algebrica tra il valore massimo e il valore minimo) si è riscontrato un valore corrispondente a:

$$\Delta T = 63.8 \text{ [mNm]}$$

La massima oscillazione di coppia ΔT si ottiene per un valore di angolo meccanico θ_m prossimo a $\frac{\pi}{2}$ [rad], posizione in corrispondenza della quale l'asse del rotore coincide con l'asse di simmetria verticale dei poli sporgenti di statore.

Funzionamento a carico

La coppia a carico presenta il massimo valore per valori di θ_m proporzionali a $K\pi$, ossia quando l'asse magnetico di rotore è ortogonale all'asse magnetico dei magneti permanenti di statore; questo è dovuto alla presenza della forza magnetomotrice che genera un flusso magnetico indotto in grado di alterare la conformazione del flusso principale, variando pertanto le posizioni del rotore corrispondenti alla coppia massima. Il valore medio di coppia ottenuto dall'analisi del modello a carico è risultato pari a:

$$T_m = 55 \text{ [mNm]}$$

Come era logico ipotizzare il valore massimo di coppia ottenuto è maggiore rispetto al massimo riscontrato nel modello precedente di microturbina analizzato nelle medesime condizioni di lavoro, questo perchè l'aggiunta delle espansioni polari ha incrementato il campo di induzione magnetica \vec{B} in alcune zone del traferro, aumentando di conseguenza il valore di coppia.

Altra grandezza di fondamentale importanza è la massima oscillazione di coppia, poichè essa esprime il massimo grado di opposizione del rotore al cambiamento di posizione; essa è risultata pari a:

$$\Delta T = 191 \text{ [mNm]}$$

La massima oscillazione di coppia ottenuta è maggiore rispetto a quella ottenuta nel precedente modello di microturbina, a testimonianza del fatto che l'apporto delle salienze di statore oltre che aumentare il valore della coppia ha aumentato anche il grado di impuntamento, ossia la tendenza del rotore a bloccarsi nella posizione di partenza.

Questo è un aspetto negativo, poichè l'ideale sarebbe ottenere una oscillazione di coppia massima ΔT il minore possibile.

Valutazione dell'energia e della coenergia

Funzionamento a vuoto

In Fig.2.48 viene proposto l'andamento dell'energia magnetica messa in gioco nello spazio occupato dal modello, è immediato notare come tale andamento sia oscillante al variare della posizione del rotore. Il massimo valore di energia magnetica riscontrato è risultato pari a:

$$W_{max} = 0.283 \text{ [J]}$$

Tale massimo è stato ottenuto per un valore di angolo meccanico θ_m pari a 1.536 [rad], molto prossimo a $\frac{\pi}{2}$ [rad], a testimonianza del fatto che l'energia magnetica messa in gioco è massima in corrispondenza della posizione del rotore per la quale si riduce al minimo l'ampiezza del traferro.

Si possono fare considerazioni del tutto analoghe analizzando il grafico della coenergia magnetica proposta in Fig.2.45, per la quale è stato riscontrato un valore massimo pari a:

$$W_{cmax} = 0.287 \text{ [J]}$$

Ottenuto in corrispondenza ad un angolo meccanico molto prossimo a $\frac{\pi}{2}$ [rad]. L'andamento del tutto analogo dei grafici dell'energia e della coenergia magnetica in funzione di θ_m è la dimostrazione di come il circuito magnetico lavori in condizioni magneticamente lineari.

Funzionamento a carico

In Fig.2.55 ed in Fig.2.56 vengono proposti i grafici dell'energia e della coenergia magnetica ottenuti in funzione della posizione del rotore θ_m considerando il modello progettato funzionante a regime sinusoidale, ed ipotizzando una forza magnetomotrice di valore massimo pari a 815 [A]. Come si può notare dalle figure, i valori massimi ottenuti sono risultati pari a:

$$W_{max} = 0.316 \text{ [J]}$$

$$W_{cmax} = 0.323 \text{ [J]}$$

Entrambi ottenuti in corrispondenza ad un angolo meccanico θ_m molto prossimo a 0.14 [rad]. In queste condizioni di lavoro vengono messi in gioco i massimi valori di energia e coenergia magnetica per valori di θ_m molto piccoli, ossia per posizioni del rotore molto vicine alla posizione iniziale.

Conclusioni

Il secondo modello di microturbina progettato è migliore del precedente, poichè l'introduzione delle salienze sullo statore aumenta i valori di flusso concatenato, coppia e forza elettromotrice generata, oltre che a migliorare la conformazione delle linee di campo di induzione magnetica al traferro.

Tuttavia la forma d'onda del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ risulta troppo lontana dalla funzione sinusoidale, e l'indice di distorsione armonica THD continua ad essere troppo elevato. Occorre dunque una accurata progettazione del rotore al fine di migliorare al massimo la forma d'onda del flusso, in modo tale da poter realizzare un generatore di buona qualità con tensione generata priva di armoniche distorcenti.

2.3 PROGETTO DEL MODELLO DEFINITIVO

2.3.1 Progetto della geometria

Contrariamente ai precedenti modelli, la cui geometria è stata disegnata in modo veloce e sbrigativo al fine di poterne eseguire in tempi brevi la simulazione mediante software FEMM, quest'ultimo prototipo di microturbina è stato progettato in modo molto accurato, in particolare per quanto riguarda forme e dimensioni.

Dallo studio del precedente modello di microgeneratore si è potuto constatare che l'aggiunta delle espansioni polari sullo statore apporta benefici, pertanto sono state mantenute in questo modello definitivo, seppur riducendone le dimensioni per facilitare l'inserimento degli avvolgimenti in fase di costruzione.

Gli angoli del circuito ferromagnetico di statore sono stati opportunamente sagomati al fine di rendere la macchina più maneggevole; sono stati inoltre predisposti dei fori per permettere il passaggio dei tiranti, i quali una volta imbullonati dovranno consentire il serraggio del pacco di lamierini.

Per quanto riguarda la configurazione dello statore non sono state apportate ulteriori modifiche. Il componente sottoposto ad una vera e propria “rivoluzione geometrica” è il rotore, il quale è stato ritenuto il maggior responsabile della distorsione della forma d’ onda del flusso concatenato. Al fine di ottenere una forza elettromotrice indotta di forma sinusoidale si è pensato di progettare un rotore avente quattro salienze, in modo da realizzare un generatore a quattro poli.

Le sporgenze sono state inoltre ideate con diversa sagomatura, al fine di adattarle perfettamente alle dimensioni e alla forma dei poli salienti di statore.

Con questi accorgimenti si era convinti di ridurre notevolmente il contenuto armonico della tensione generata. La configurazione geometrica del modello definitivo viene qui di seguito riportata:

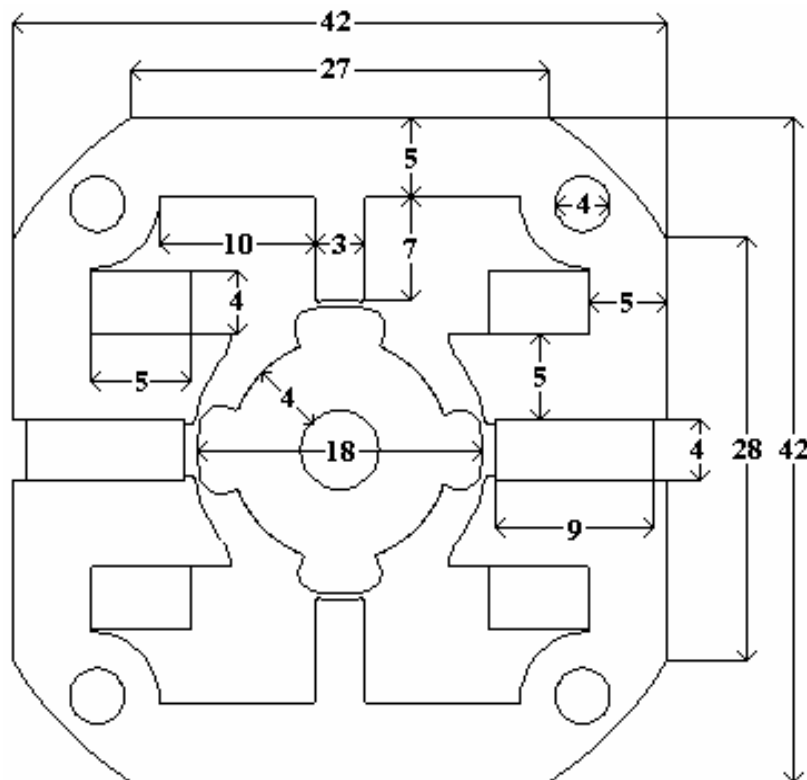


Fig. 2.59: Modello definitivo di microturbina - SCALA 2:1

2.3.2 Simulazione del modello a vuoto

Si procede ora all'analisi del terzo modello di microturbina progettato mediante l'ausilio del software FEMM, riproponendo passo passo la procedura già seguita durante l'analisi dei modelli precedenti.

Ci si pone dunque come obiettivo primario la realizzazione dei grafici del flusso concatenato, della coppia, della tensione generata, di energia e coenergia magnetica in funzione della posizione angolare del rotore espressa da θ_m .

Disponendo di tali grafici si può esprimere immediatamente un grado di giudizio sulla bontà del modello proposto, ed in caso di esito positivo, passare finalmente alla costruzione del microgeneratore. Al fine di eseguire una attenta e accurata simulazione è doveroso seguire pedissequamente la seguente procedura:

Definizione del problema

Per prima cosa è necessario definire il tipo di modello da porre sotto analisi, introducendo i dati iniziali necessari alla risoluzione del problema. Nell'ambiente di lavoro FEMM, accedendo alla voce *Problem definition* sono state introdotte le seguenti impostazioni:

- *Problem type*: Planar
- *Length units*: Millimeters
- *Frequency*: 0 [Hz]
- *Depth*: 20 [mm]
- *Solver precision*: $1 \cdot 10^{-8}$

Disegno della geometria

Una volta definito il problema da risolvere si è proceduto a disegnare nella finestra grafica iniziale la configurazione geometrica del modello di microturbina prestabilito, la quale viene riportata nella sottostante figura:

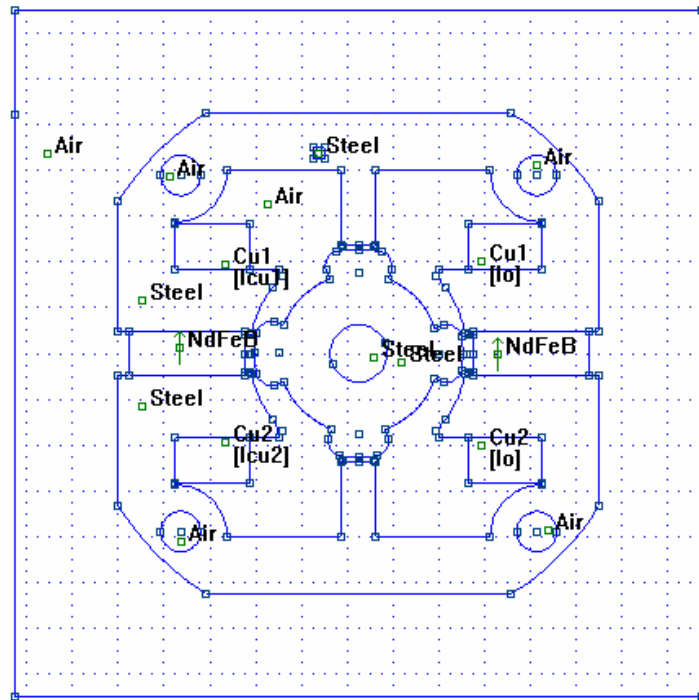


Fig. 2.60: Terzo modello di microturbina (modello definitivo)

Condizioni al contorno

Tra i dati iniziali necessari alla risoluzione del problema definito rientrano certamente le condizioni al contorno, le quali forniscono importanti informazioni sull' andamento delle linee di campo lungo i bordi del dominio. Come nei precedenti modelli sono state introdotte le seguenti condizioni:

- *Condizione di Neumann*: è stata assegnata la condizione $\frac{d\vec{A}}{dn} = 0$
- *Condizione di Dirichlet*: è stata assegnata la condizione $\vec{A} = 0$

Definizione dei materiali

Disegnata la configurazione geometrica del modello da analizzare ed introdotte le condizioni al contorno si passa dunque alla definizione dei materiali con i quali verrà costruita la microturbina. Si elencano qui di seguito le caratteristiche fisiche dei materiali definiti:

- *Acciaio*:
è il materiale ferromagnetico con il quale si prevede di realizzare il rotore ed il nucleo di statore della microturbina, è caratterizzato dalle seguenti grandezze fisiche:
 - permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 760$
 - permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 760$
 - curva di magnetizzazione $B = f(H)$ non lineare:

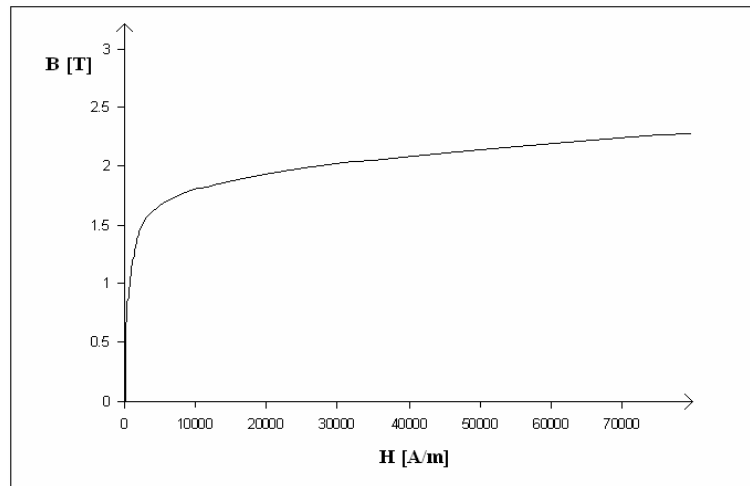


Fig. 2.61: Curva di magnetizzazione dell' acciaio

- *Aria*:
è il materiale che circonda il modello di microturbina che si prevede di realizzare, esso sarà caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:
 - permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
 - conducibilità elettrica $\sigma = 0$ [Ms/m].
- *Rame*:
è il materiale con il quale si prevede di realizzare l' avvolgimento di statore sede di forza elettromotrice indotta, il quale presenta le seguenti caratteristiche:
 - permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
 - conducibilità elettrica $\sigma = 58$ [Ms/m].
 - curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare.

- *Lega di Neodimio:*

è il materiale con il quale si prevede di realizzare i magneti permanenti della microturbina, ossia la principale sorgente di campo magnetico. In particolare il materiale magnetico impiegato è una lega di Neodimio Ferro e Boro (NdFeB) e presenta le seguenti caratteristiche:

- permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 1.048$
- permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 1.048$
- campo coercitivo: $H_c = 950000$ [A/m].
- conducibilità elettrica: $\sigma = 0.667$ [Ms/m].
- induzione magnetica residua: $B_{rem} = 1.05$ [T].
- curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare:

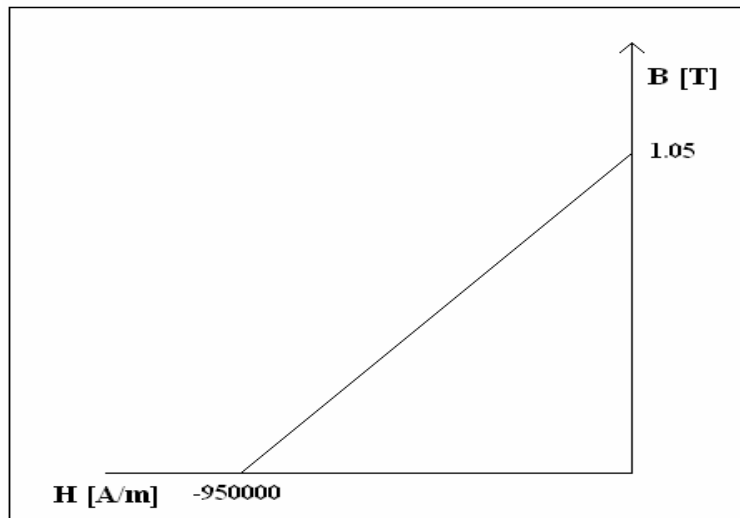


Fig. 2.62: Curva di magnetizzazione del NdFeB

Definizione delle sorgenti

Per definire le sorgenti di campo magnetico occorre distinguere il funzionamento a vuoto da quello a carico. Durante il funzionamento a vuoto l'unica sorgente di campo magnetico è costituita dai magneti permanenti posti sullo statore, mentre nel funzionamento a carico si dovranno considerare come sorgenti di campo anche le forze magnetomotrici generate dalle bobine di statore percorse da corrente.

Creazione della mesh

Come già esposto nei precedenti paragrafi è possibile creare automaticamente la Mesh mandando in esecuzione l'applicazione *triangle.exe*, attivabile dalla schermata principale cliccando sull'opzione *Create Mesh*.

La procedura creazione della Mesh in questo terzo modello è stata eseguita con estrema cura e precisione, disponendo elementi (triangoli) di minori dimensioni al traferro e nelle zone di maggiore interesse, al fine di ottenere soluzioni il più possibile precise (a discapito purtroppo di una riduzione della velocità computazionale).

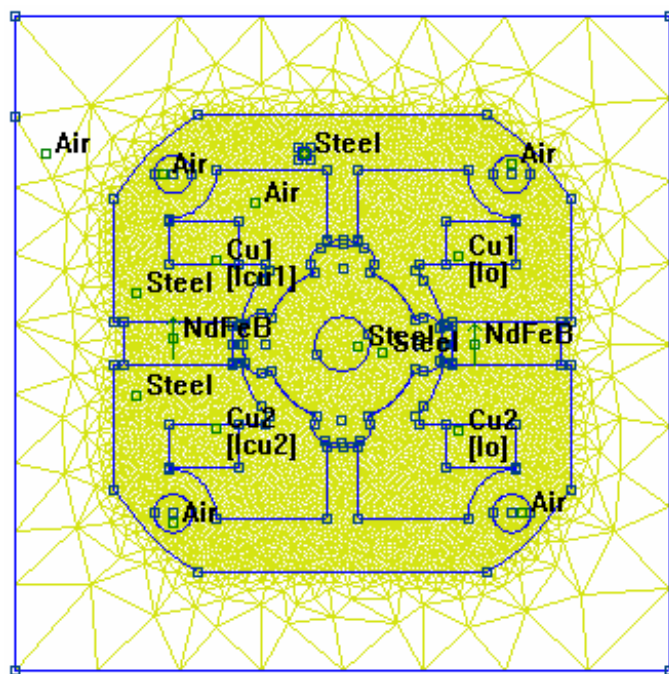


Fig. 2.63: Mesh ad elementi triangolari (modello definitivo)

Visualizzazione dei risultati

Si procede ora all'analisi del modello di microturbina progettato, i cui risultati si possono visualizzare nella "*Femm View*", una finestra grafica che consente all'utente di rilevare il valore delle grandezze fisiche desiderate in ogni punto del dominio.

Il risultato ottenuto dalla simulazione viene riportato in Fig.2.64 nella pagina successiva, nella quale si possono osservare le linee di flusso generate dai magneti permanenti e l'intensità del campo di induzione magnetica \vec{B} nelle diverse regioni del dominio.

Per prima cosa si osserva che la densità di flusso è piuttosto uniforme nella superficie della corona di statore, il cui valore varia dai 0.5 ai 0.8 [T]. Il massimo valore di $|\vec{B}|$ si ottiene nella superficie dei denti di statore, introdotti al fine di migliorare la forma d'onda del flusso concatenato; tale valore è circa pari a 1.85 [T].

Per quanto riguarda l'intensità di campo nella superficie di rotore essa appare abbastanza uniforme variando da 1.2 [T] in corrispondenza delle salienze a 0.7 [T] nelle zone corrispondenti all'albero.

Si osserva inoltre che le linee di flusso uscenti dal circuito ferromagnetico sono ridotte al minimo e questo è certamente un aspetto positivo, poichè riducendo al minimo il tratto in aria si riduce la riluttanza magnetica complessiva.

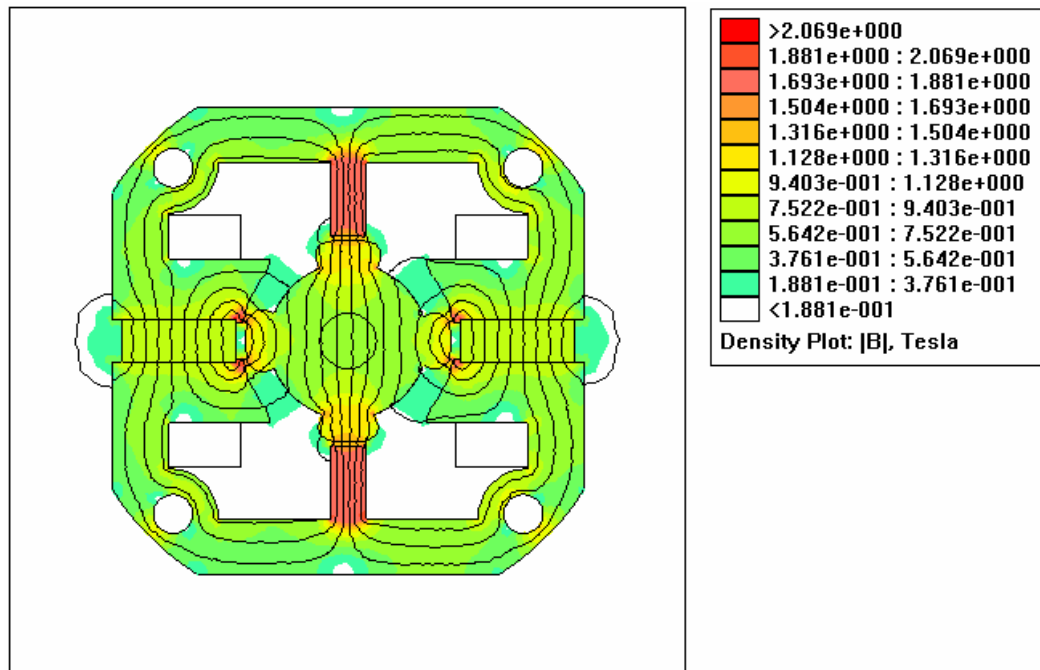


Fig. 2.64: Simulazione a vuoto del modello definitivo

Si procede ora con l'analisi delle grandezze elettromagnetiche nella zona di maggior interesse, ovvero lungo la lunghezza del traferro:

Potenziale vettore magnetico

Si riporta nella seguente figura il grafico del potenziale vettore magnetico (A_z nel caso bidimensionale) in funzione della lunghezza del traferro; come si può osservare nel funzionamento a vuoto l'andamento della curva è del tutto analogo alle forma d'onda dei precedenti modelli, ma con valori complessivamente minori.

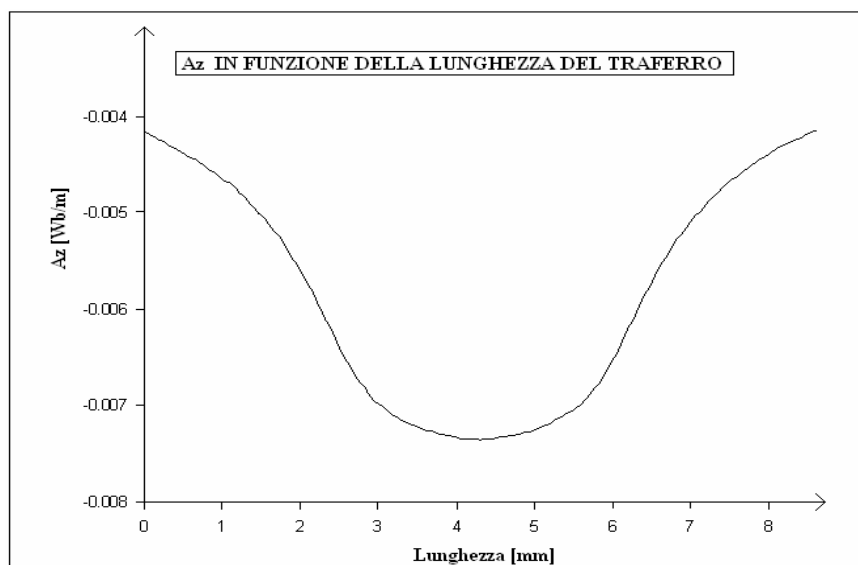


Fig. 2.65: Potenziale vettore magnetico A_z lungo il traferro

Campo di induzione magnetica

Viene riportato nella seguente figura il modulo del campo \dot{B} in funzione della lunghezza del traferro, ottenuto considerando il rotore nella posizione iniziale corrispondente a $\theta_m = 0$.

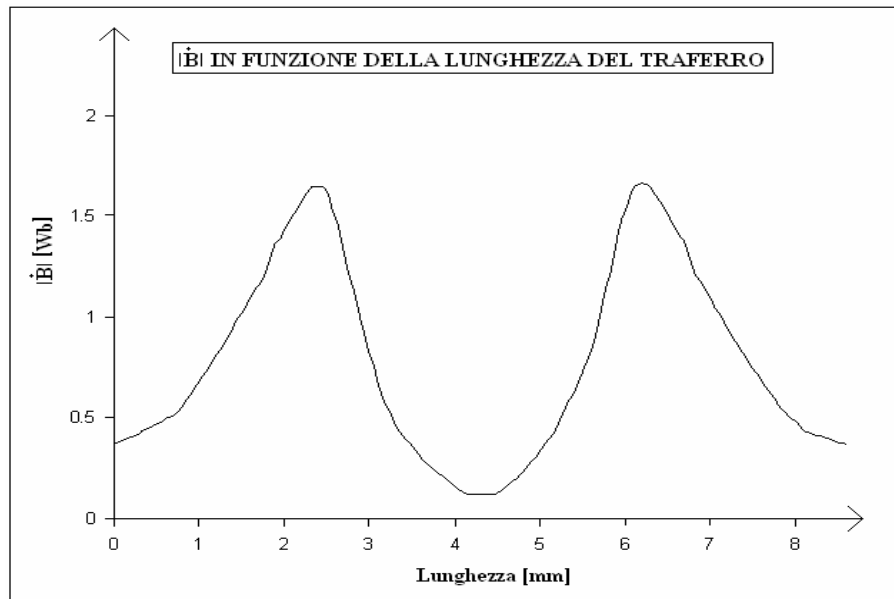


Fig. 2.66: Modulo del campo di induzione magnetica al traferro

Campo magnetico

Si riporta infine l'andamento del campo magnetico $|\dot{H}|$ in funzione della lunghezza del traferro, la quale presenta ovviamente la stessa forma d'onda del campo \dot{B} , poichè la riluttanza dell'aria μ_0 è costante. La curva ottenuta presenta lo stesso andamento grafico dei modelli precedenti, seppur con valori più elevati.

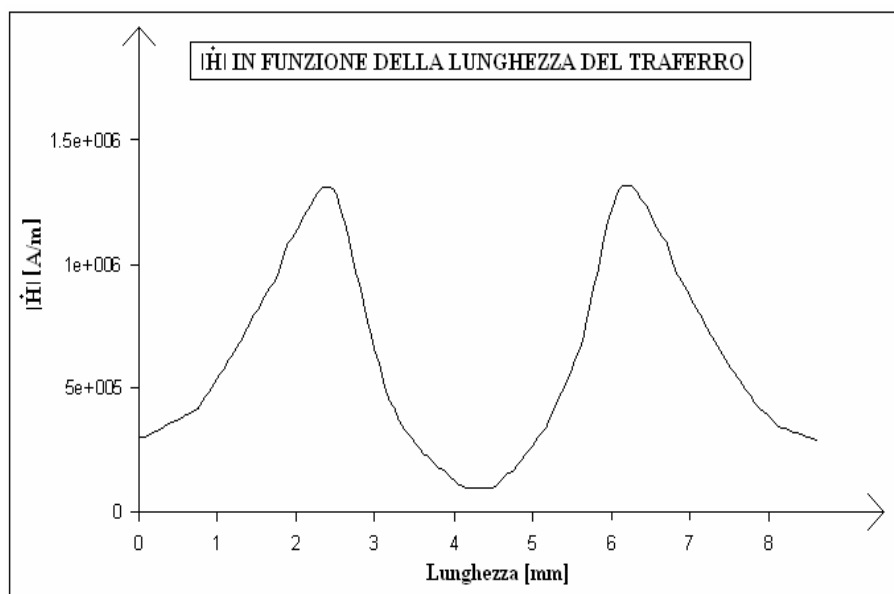


Fig. 2.67: Modulo del campo magnetico al traferro

Analisi ricorsiva mediante software LUA

Si procede ora all'analisi del comportamento elettromagnetico del modello progettato tracciando i grafici dei parametri di maggior interesse in funzione dell'angolo meccanico θ_m , ovvero flusso concatenato, coppia, tensione generata, energia e coenergia magnetica. Esattamente come nell'analisi dei precedenti modelli si utilizza uno script in codice LUA in grado di eseguire diverse simulazioni al variare della posizione del rotore, salvando i risultati ottenuti in un file di testo, i quali sono stati successivamente raccolti nella tabella sottostante:

Tabella 2.13: Risultati dall'analisi a carico del modello definitivo

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Tensione [V]	Coppia [Nm]	Energia [J]	Coenergia [J]
0	-8,04E-06	15,504	4,55E-04	0,6447	0,6617
0,035	-3,12E-03	15,315	1,20E-03	0,6449	0,6617
0,070	-6,12E-03	14,829	7,03E-03	0,6457	0,6619
0,105	-8,89E-03	14,053	8,76E-03	0,6472	0,6623
0,140	-1,14E-02	13,004	1,04E-02	0,6492	0,6626
0,175	-1,36E-02	11,702	9,31E-03	0,6514	0,6629
0,209	-1,56E-02	10,172	8,97E-03	0,6536	0,6633
0,244	-1,73E-02	8,445	1,11E-02	0,6552	0,6636
0,279	-1,89E-02	6,552	9,97E-03	0,6563	0,6640
0,314	-2,03E-02	4,533	1,16E-02	0,6570	0,6644
0,349	-2,15E-02	2,425	7,69E-03	0,6575	0,6648
0,384	-2,23E-02	0,270	3,64E-03	0,6577	0,6651
0,419	-2,25E-02	-1,891	-9,49E-04	0,6574	0,6651
0,454	-2,23E-02	-4,014	-5,51E-03	0,6572	0,6650
0,489	-2,15E-02	-6,060	-7,31E-03	0,6573	0,6648
0,524	-2,02E-02	-7,987	-8,83E-03	0,6576	0,6645
0,559	-1,83E-02	-9,759	-6,79E-03	0,6582	0,6643
0,593	-1,60E-02	-11,341	-1,75E-03	0,6589	0,6641
0,628	-1,33E-02	-12,703	3,32E-03	0,6596	0,6642
0,663	-1,03E-02	-13,817	6,48E-03	0,6602	0,6643
0,698	-7,18E-03	-14,662	6,40E-03	0,6608	0,6645
0,733	-3,97E-03	-15,222	3,39E-03	0,6611	0,6647
0,768	-7,48E-04	-15,485	4,74E-04	0,6612	0,6647
0,803	2,46E-03	-15,447	-2,25E-03	0,6610	0,6646
0,838	5,68E-03	-15,109	-5,83E-03	0,6609	0,6645
0,873	8,86E-03	-14,476	-7,77E-03	0,6605	0,6644
0,908	1,20E-02	-13,562	-7,08E-03	0,6599	0,6641
0,942	1,49E-02	-12,383	-3,69E-04	0,6592	0,6640
0,977	1,75E-02	-10,964	7,13E-03	0,6587	0,6642
1,012	1,97E-02	-9,331	1,20E-02	0,6579	0,6644
1,047	2,15E-02	-7,517	1,24E-02	0,6576	0,6648
1,082	2,27E-02	-5,556	8,25E-03	0,6573	0,6652
1,117	2,35E-02	-3,487	1,30E-03	0,6572	0,6654
1,152	2,36E-02	-1,350	-8,27E-03	0,6570	0,6652
1,187	2,32E-02	0,813	-1,07E-02	0,6570	0,6648
1,222	2,23E-02	2,960	-8,23E-03	0,6569	0,6645
1,257	2,12E-02	5,049	-3,37E-03	0,6569	0,6643
1,292	1,97E-02	7,041	-2,19E-03	0,6566	0,6640
1,326	1,80E-02	8,895	1,70E-03	0,6564	0,6641
1,361	1,61E-02	10,576	4,82E-03	0,6556	0,6642
1,396	1,41E-02	12,051	6,82E-03	0,6544	0,6644
1,431	1,17E-02	13,292	1,14E-02	0,6528	0,6646
1,466	9,10E-03	14,274	1,57E-02	0,6517	0,6651
1,501	6,24E-03	14,978	1,46E-02	0,6508	0,6656
1,536	3,17E-03	15,391	1,08E-02	0,6503	0,6659
1,571	1,80E-05	15,504	-1,54E-03	0,6502	0,6661

Grafico del flusso concatenato

Grazie ai dati raccolti nella precedente tabella (nella quale per semplicità sono stati riportati i valori ottenuti fino a $\theta_m = \frac{\pi}{2}$ [rad]) è stato possibile tracciare facilmente il grafico del flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore al variare della posizione angolare del rotore; la forma d'onda risultante viene riportata nella sottostante figura:

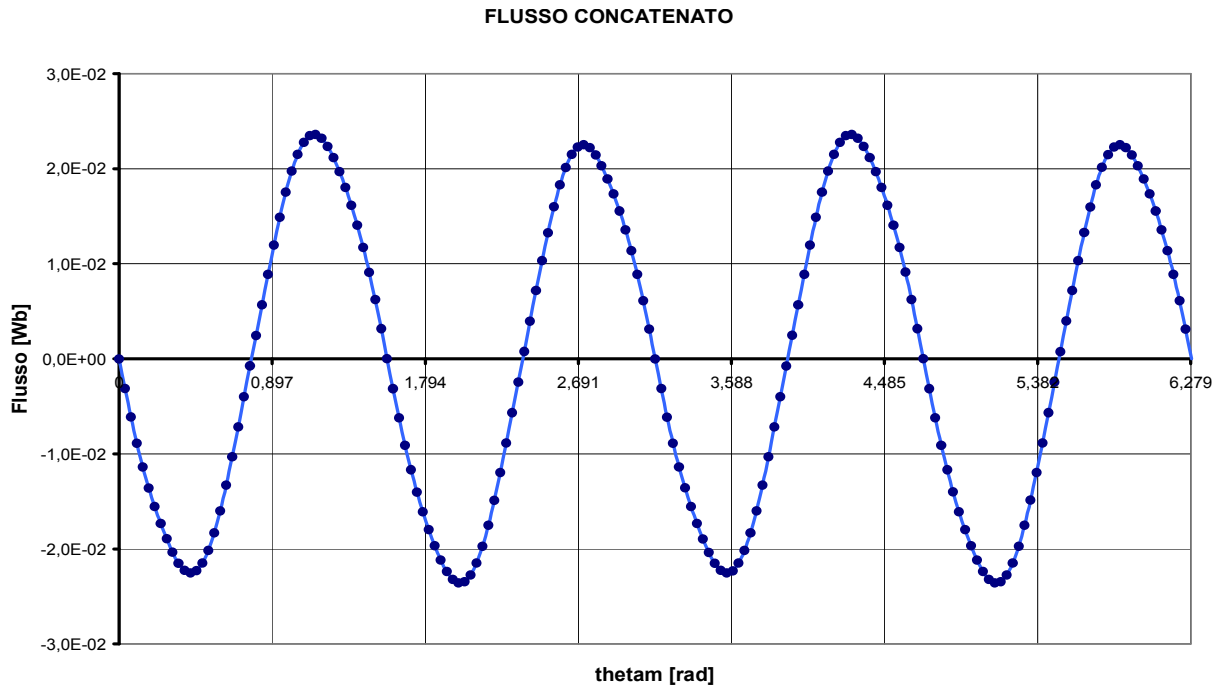


Fig. 2.68: Flusso concatenato in funzione di θ_m (modello definitivo a vuoto)

Grafico della coppia

Si riporta nella figura qui di seguito il grafico della coppia in funzione dell'angolo meccanico θ_m agente sul rotore della microturbina progettata funzionante a vuoto:

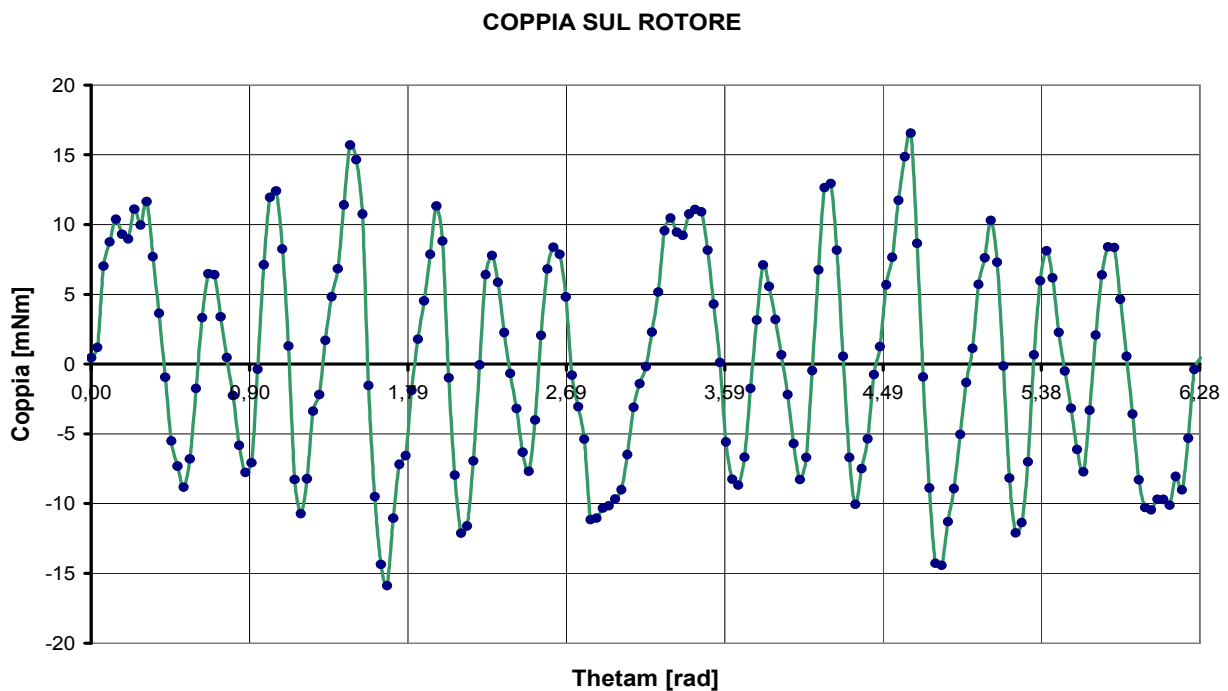


Fig. 2.69: Coppia sul rotore in funzione di θ_m (modello definitivo a vuoto)

Grafico dell' energia magnetica

Nella sottostante figura si può osservare il grafico dell' energia magnetica messa in gioco nel volume complessivamente occupato dal modello, esso risulta periodico di periodo pari a π [rad] e raggiunge il valore massimo di 0.661 [J] in corrispondenza a $\theta_m = 0.768$ [rad].

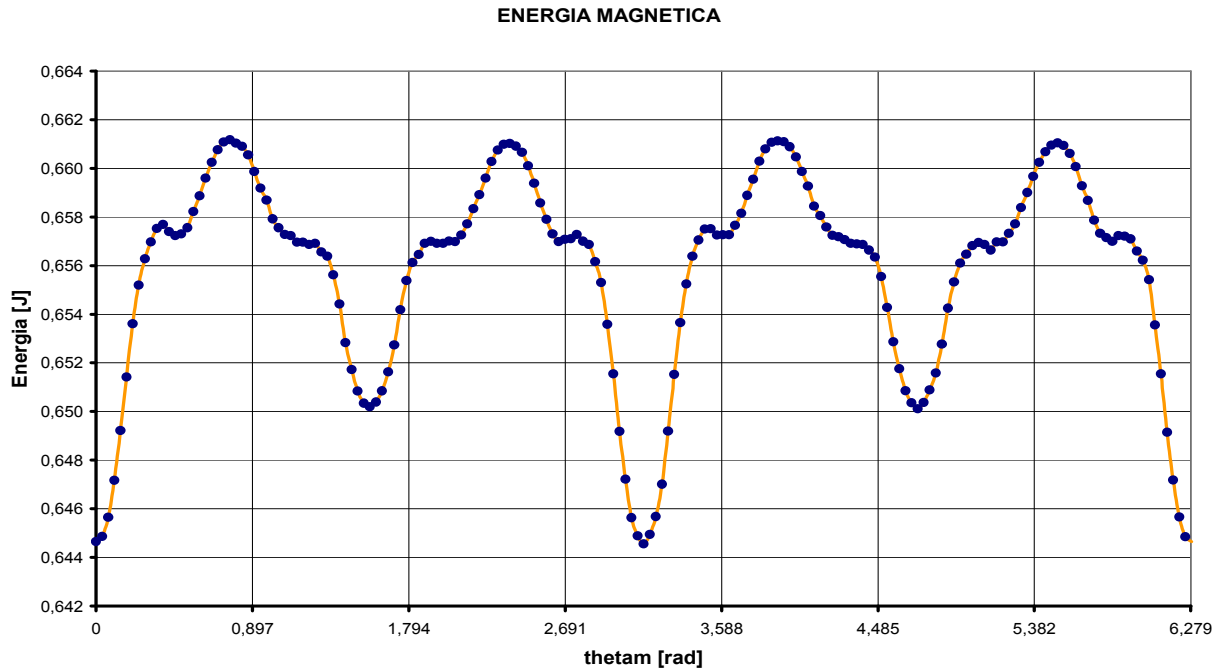


Fig. 2.70: Energia magnetica in funzione di θ_m (modello definitivo a vuoto)

Grafico della coenergia magnetica

Viene riportata nella sottostante figura la grandezza duale all' energia, ovvero la coenergia magnetica al variare della posizione angolare del rotore. Essa risulta periodica di periodo π [rad] e presenta un massimo di 0.6661 [J] in corrispondenza a $\frac{\pi}{2}$ [rad]. Si rimanda al paragrafo 2.2.5 una descrizione più dettagliata dei grafici ottenuti.

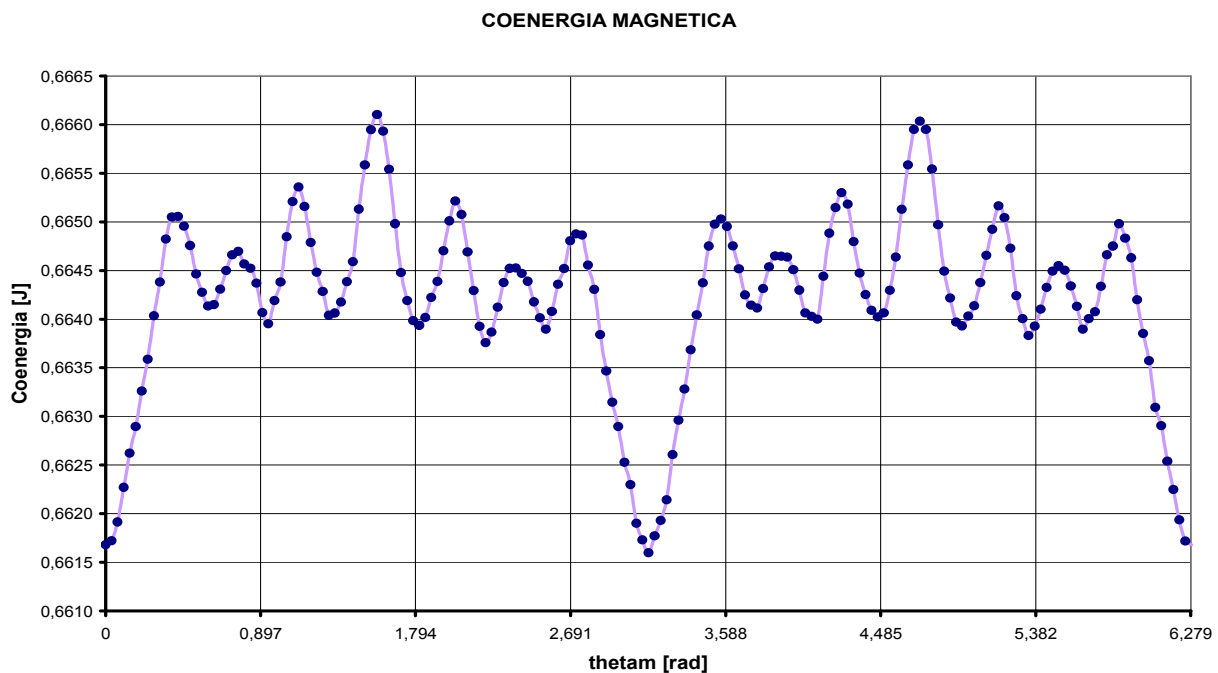


Fig. 2.71: Coenergia magnetica in funzione di θ_m (modello definitivo a vuoto)

Forza elettromotrice indotta

Al fine della stima della forza elettromotrice generata da questo modello di microturbina è stata applicata la nota relazione (2.3), ovvero la legge di Faraday-Neumann:

$$e(t) = -\frac{d\Phi_c(t)}{dt}$$

Così come si è proceduto nei modelli precedenti, al fine di stimare l'ampiezza della tensione indotta è stata effettuata la scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ mediante lo script realizzato in codice MATLAB già descritto in precedenza, mediante il quale è stato possibile implementare l'equazione di Fourier (2.4) ovvero:

$$\Phi_c(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)]$$

Lo stesso script impiegato per l'implementazione della suddetta relazione permette la determinazione dei coefficienti a_k e b_k necessari al calcolo dell'ampiezza di ciascuna delle componenti armoniche, oltre alla stima della loro fase. I risultati ottenuti sono stati ordinati e raccolti nella tabella sottostante:

Tabella 2.14: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ (modello 3)

ORDINE DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Veffk [Wb]	Phase [rad]
1	-3,99E-04	-2,28E-02	1,61E-02	-1,553
2	-2,58E-05	1,00E-03	7,00E-04	1,544
3	-3,69E-05	0	0	0,315
4	-2,74E-05	-4,00E-04	3,00E-04	-1,501
5	-5,20E-06	0	0	-1,454

Elaborando i valori efficaci delle cinque principali armoniche nelle quali è stato scomposto il flusso $\Phi_c(\theta_m)$ si sono potuti calcolare i tre parametri fondamentali che esprimono il grado di distorsione armonica della forma d'onda originaria.

Applicando l'equazione (2.45) il **valore efficace** del flusso concatenato è risultato pari a:

$$F = 1.61 \cdot 10^{-2} \text{ [Wb]}$$

Applicando l'equazione (2.46) il **fattore di distorsione** è risultato pari a:

$$F_{dis} = 8.78 \cdot 10^{-4} \text{ [Wb]}$$

Applicando l'equazione (2.46) il **Total harmonic distortion** è risultato pari a:

$$THD = 5.44 \%$$

Vengono riportati nella sottostante tabella tutti i valori delle cinque principali armoniche nelle quali è stato scomposto il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ al variare della posizione angolare del rotore:

Tabella 2.15: Sviluppo in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ (modello3)

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Y1 [Wb]	Y2 [Wb]	Y3 [Wb]	Y4 [Wb]	Y5 [Wb]	Fo [Wb]
0	-8,04E-06	-3,99E-05	-2,58E-05	-3,69E-05	-2,74E-05	-5,20E-06	4,88E-04
0,035	-3,12E-03	-3,21E-03	2,51E-04	-3,37E-05	-2,35E-04	-3,98E-06	4,88E-04
0,070	-6,12E-03	-6,32E-03	5,08E-04	-2,47E-05	-3,72E-04	-9,02E-07	4,88E-04
0,105	-8,89E-03	-9,31E-03	7,26E-04	-1,14E-05	-3,95E-04	2,60E-06	4,88E-04
0,140	-1,14E-02	-1,21E-02	8,88E-04	3,86E-06	-2,98E-04	4,89E-06	4,88E-04
0,175	-1,36E-02	-1,47E-02	9,80E-04	1,85E-05	-1,11E-04	4,89E-06	4,88E-04
0,209	-1,56E-02	-1,70E-02	9,97E-04	2,99E-05	1,10E-04	2,60E-06	4,88E-04
0,244	-1,73E-02	-1,89E-02	9,37E-04	3,61E-05	2,98E-04	-9,05E-07	4,88E-04
0,279	-1,89E-02	-2,05E-02	8,04E-04	3,61E-05	3,95E-04	-3,99E-06	4,88E-04
0,314	-2,03E-02	-2,17E-02	6,08E-04	2,98E-05	3,72E-04	-5,20E-06	4,88E-04
0,349	-2,15E-02	-2,25E-02	3,66E-04	1,84E-05	2,36E-04	-3,98E-06	4,88E-04
0,384	-2,23E-02	-2,28E-02	9,52E-05	3,84E-06	2,83E-05	-8,99E-07	4,88E-04
0,419	-2,25E-02	-2,27E-02	-1,83E-04	-1,14E-05	-1,88E-04	2,60E-06	4,88E-04
0,454	-2,23E-02	-2,21E-02	-4,47E-04	-2,47E-05	-3,47E-04	4,89E-06	4,88E-04
0,489	-2,15E-02	-2,11E-02	-6,76E-04	-3,37E-05	-4,01E-04	4,88E-06	4,88E-04
0,524	-2,02E-02	-1,97E-02	-8,53E-04	-3,69E-05	-3,33E-04	2,60E-06	4,88E-04
0,559	-1,83E-02	-1,79E-02	-9,64E-04	-3,37E-05	-1,63E-04	-9,09E-07	4,88E-04
0,593	-1,60E-02	-1,58E-02	-1,00E-03	-2,47E-05	5,56E-05	-3,99E-06	4,88E-04
0,628	-1,33E-02	-1,34E-02	-9,59E-04	-1,14E-05	2,58E-04	-5,20E-06	4,88E-04
0,663	-1,03E-02	-1,07E-02	-8,43E-04	3,89E-06	3,81E-04	-3,98E-06	4,88E-04
0,698	-7,18E-03	-7,75E-03	-6,62E-04	1,85E-05	3,89E-04	-8,96E-07	4,88E-04
0,733	-3,97E-03	-4,69E-03	-4,30E-04	2,99E-05	2,79E-04	2,61E-06	4,88E-04
0,768	-7,48E-04	-1,54E-03	-1,64E-04	3,61E-05	8,34E-05	4,89E-06	4,88E-04
0,803	2,46E-03	1,64E-03	1,14E-04	3,61E-05	-1,37E-04	4,88E-06	4,88E-04
0,838	5,68E-03	4,79E-03	3,84E-04	2,98E-05	-3,16E-04	2,59E-06	4,88E-04
0,873	8,86E-03	7,84E-03	6,24E-04	1,84E-05	-3,99E-04	-9,12E-07	4,88E-04
0,908	1,20E-02	1,07E-02	8,15E-04	3,82E-06	-3,60E-04	-3,99E-06	4,88E-04
0,943	1,49E-02	1,34E-02	9,43E-04	-1,14E-05	-2,12E-04	-5,20E-06	4,88E-04
0,977	1,75E-02	1,59E-02	9,99E-04	-2,47E-05	4,41E-08	-3,98E-06	4,88E-04
1,012	1,97E-02	1,80E-02	9,76E-04	-3,37E-05	2,13E-04	-8,93E-07	4,88E-04
1,047	2,15E-02	1,98E-02	8,79E-04	-3,69E-05	3,60E-04	2,61E-06	4,88E-04
1,082	2,27E-02	2,12E-02	7,13E-04	-3,37E-05	3,99E-04	4,89E-06	4,88E-04
1,117	2,35E-02	2,21E-02	4,91E-04	-2,47E-05	3,16E-04	4,88E-06	4,88E-04
1,152	2,36E-02	2,27E-02	2,32E-04	-1,14E-05	1,37E-04	2,59E-06	4,88E-04
1,187	2,32E-02	2,28E-02	-4,49E-05	3,91E-06	-8,35E-05	-9,15E-07	4,88E-04
1,222	2,23E-02	2,24E-02	-3,19E-04	1,85E-05	-2,79E-04	-3,99E-06	4,88E-04
1,257	2,12E-02	2,17E-02	-5,68E-04	2,99E-05	-3,89E-04	-5,20E-06	4,88E-04
1,292	1,97E-02	2,05E-02	-7,73E-04	3,61E-05	-3,81E-04	-3,97E-06	4,88E-04
1,327	1,80E-02	1,89E-02	-9,18E-04	3,61E-05	-2,58E-04	-8,90E-07	4,88E-04
1,361	1,61E-02	1,69E-02	-9,92E-04	2,98E-05	-5,55E-05	2,61E-06	4,88E-04
1,396	1,41E-02	1,46E-02	-9,89E-04	1,84E-05	1,63E-04	4,89E-06	4,88E-04
1,431	1,17E-02	1,20E-02	-9,10E-04	3,80E-06	3,33E-04	4,88E-06	4,88E-04
1,466	9,10E-03	9,23E-03	-7,60E-04	-1,15E-05	4,01E-04	2,59E-06	4,88E-04
1,501	6,24E-03	6,23E-03	-5,51E-04	-2,47E-05	3,47E-04	-9,18E-07	4,88E-04
1,536	3,17E-03	3,12E-03	-2,99E-04	-3,37E-05	1,88E-04	-3,99E-06	4,88E-04
1,571	1,80E-05	-5,39E-05	-2,46E-05	-3,69E-05	-2,84E-05	-5,20E-06	4,88E-04

Si riporta qui di seguito il contenuto armonico del flusso concatenato, dove vengono riportati gli andamenti grafici delle prime cinque armoniche in funzione dell'angolo meccanico θ_m .

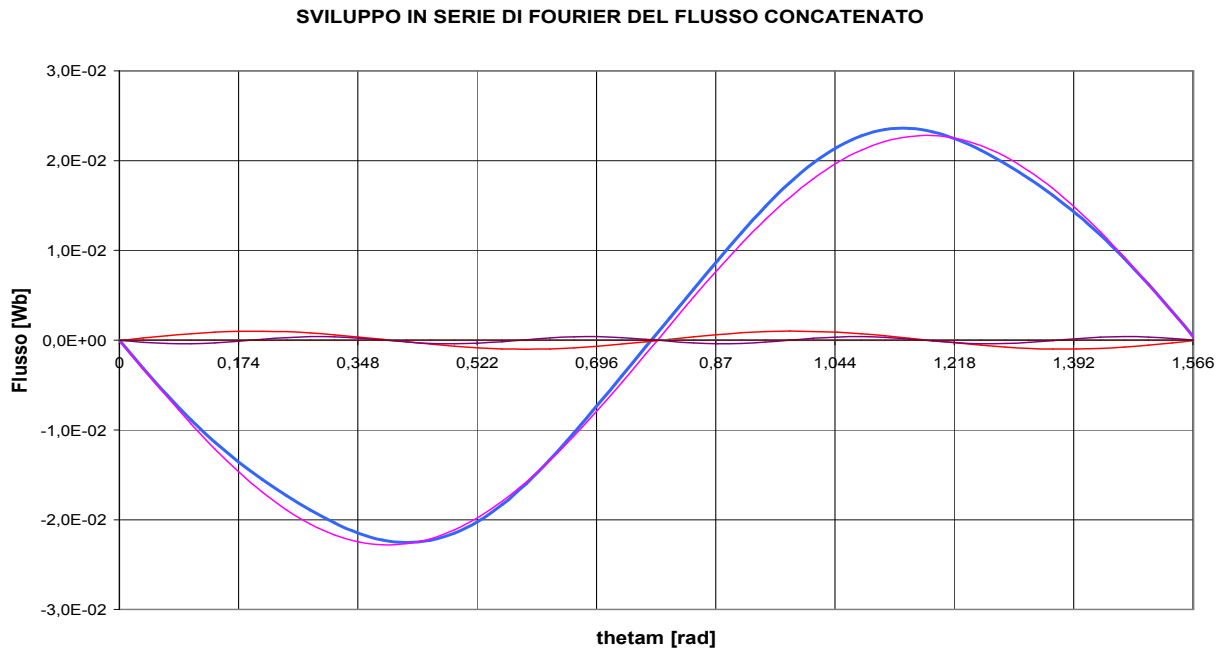


Fig. 2.72: Contenuto armonico del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ (modello 3 a vuoto)

Una volta determinate le ampiezze delle principali armoniche che costituiscono la serie di Fourier del flusso concatenato è stato possibile ricostruire la forma d'onda della forza elettromotrice indotta negli avvolgimenti di statore connessi in serie mediante la nota relazione:

$$e(t) = \sum_{k=1}^n [k \cdot \omega \cdot a_k \sin(k\omega t) - k \cdot \omega \cdot b_k \cos(k\omega t)]$$

Il cui andamento grafico in funzione della posizione del rotore viene qui di seguito riportato:

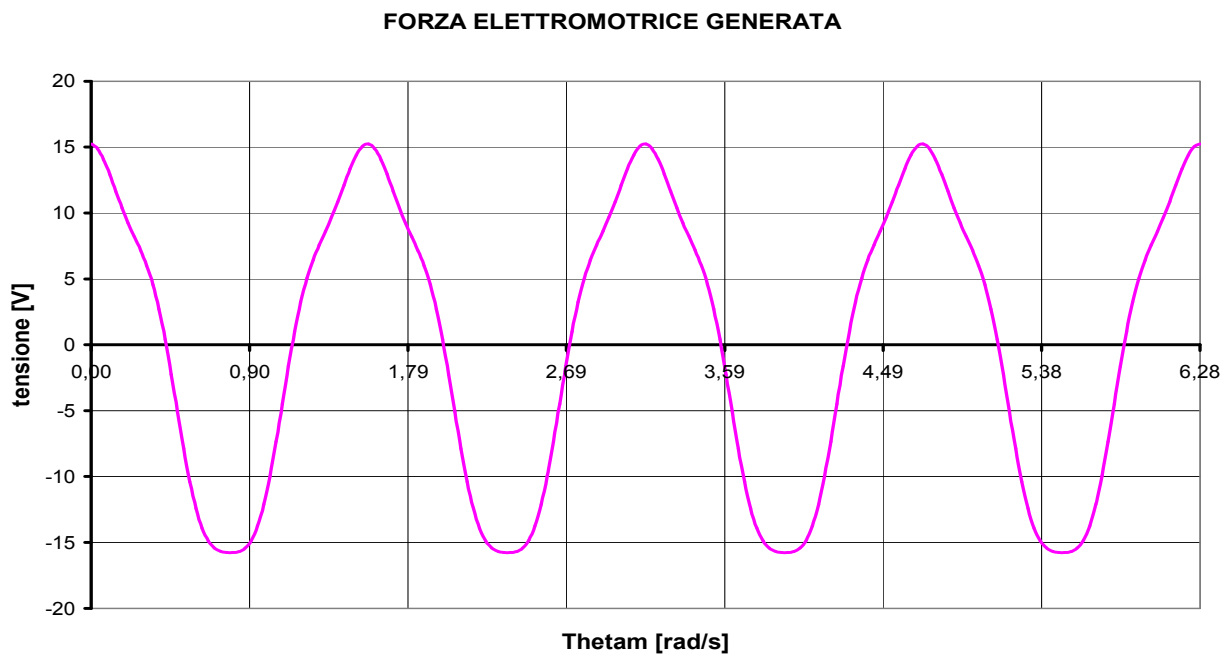
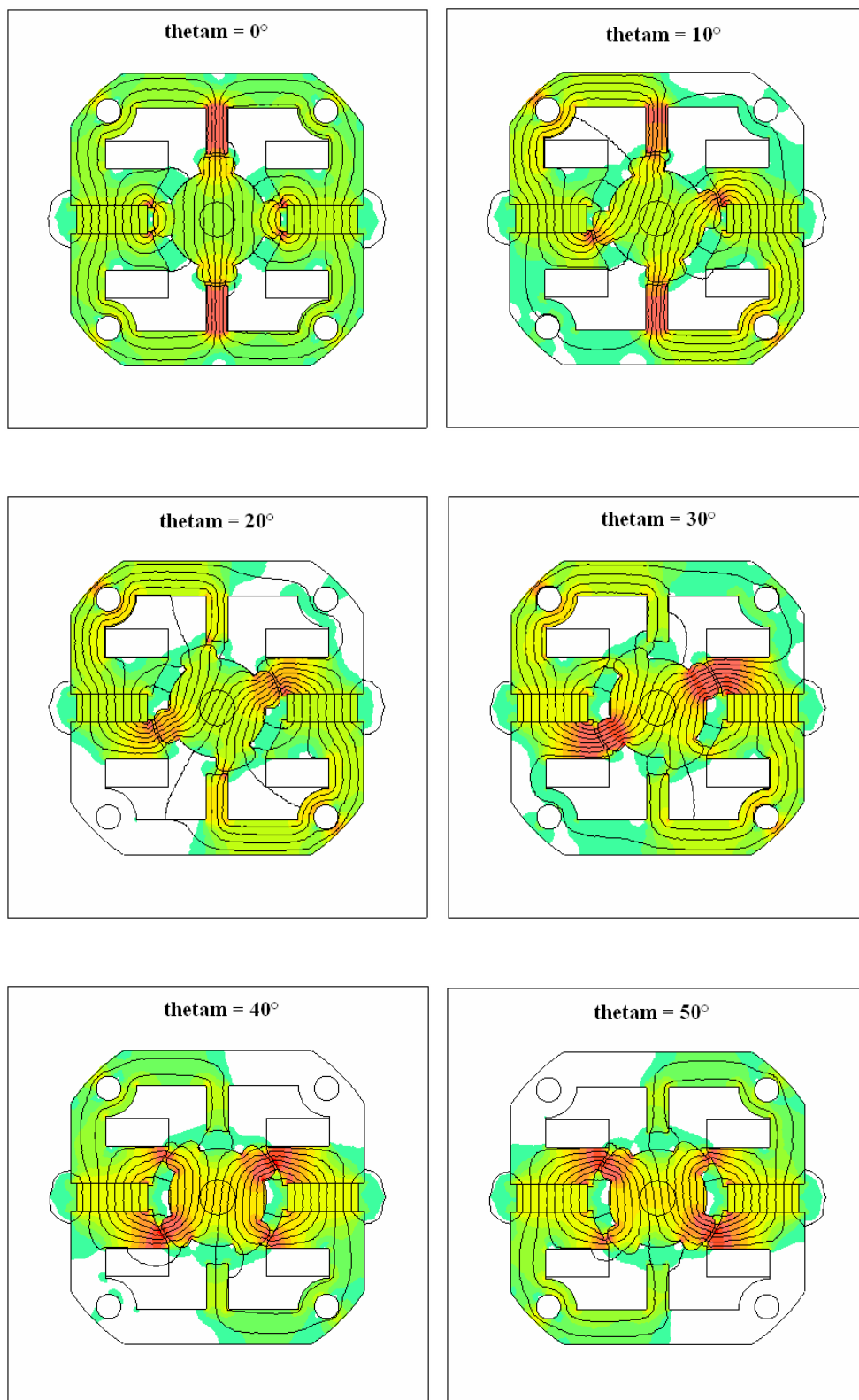
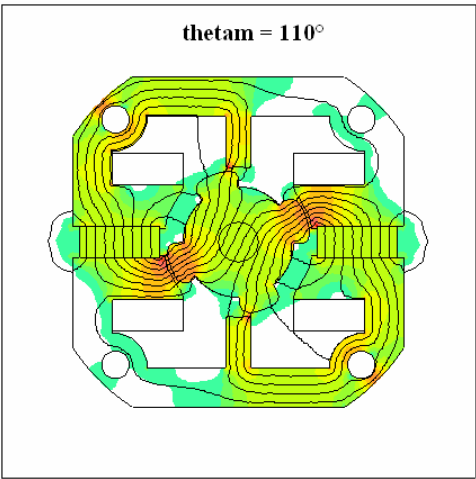
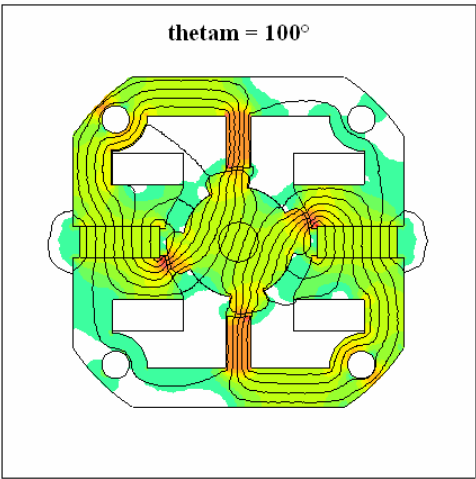
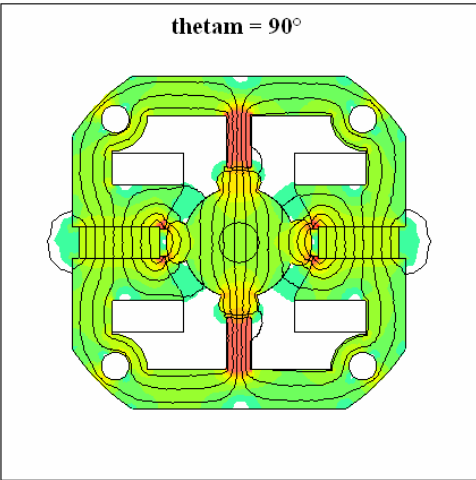
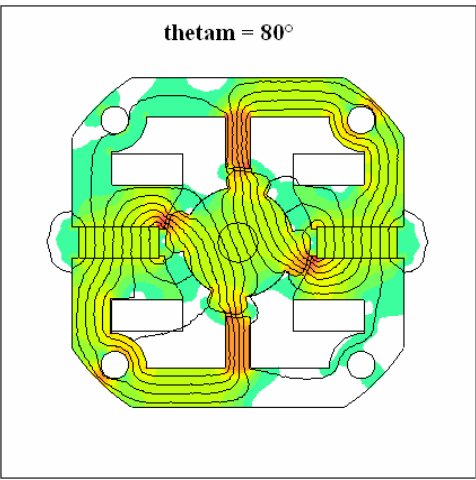
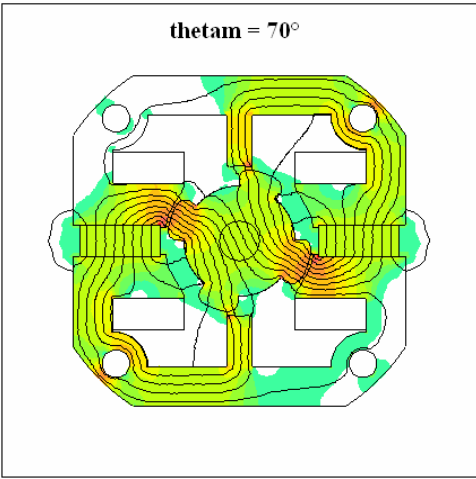
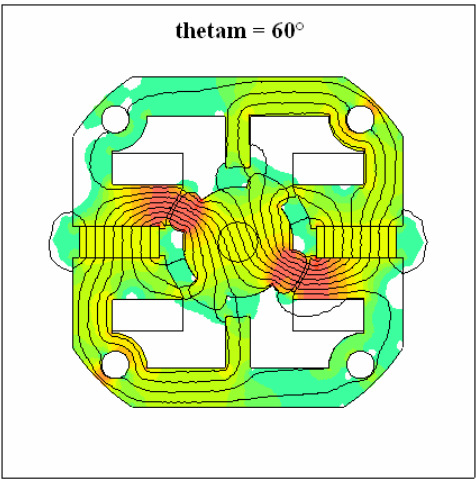


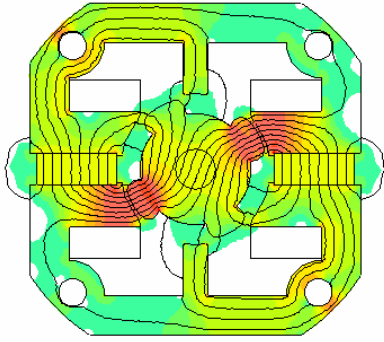
Fig. 2.73: Tensione generata a vuoto dalla microturbina (modello 3)

ANALISI A VUOTO AL VARIARE DI θ_m :

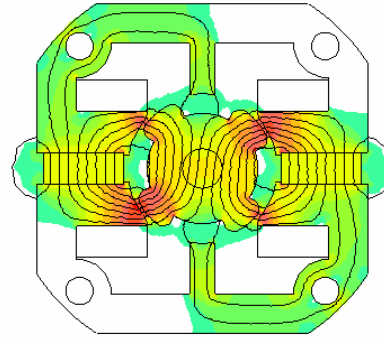




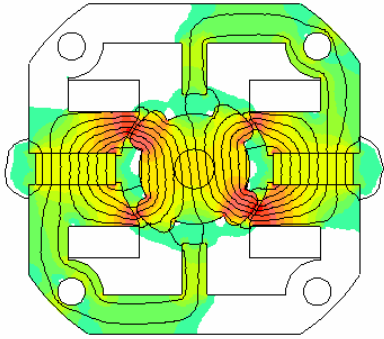
thetam = 120°



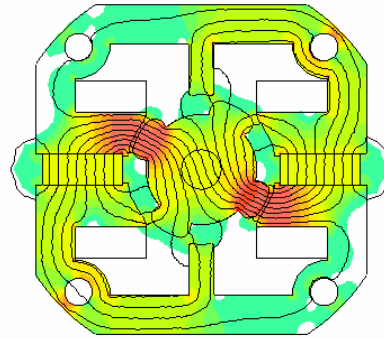
thetam = 130°



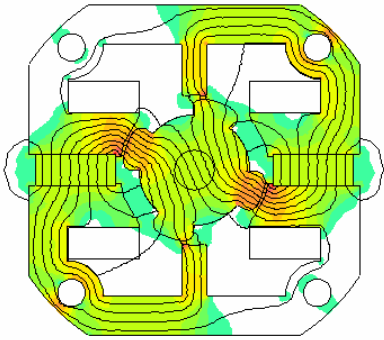
thetam = 140°



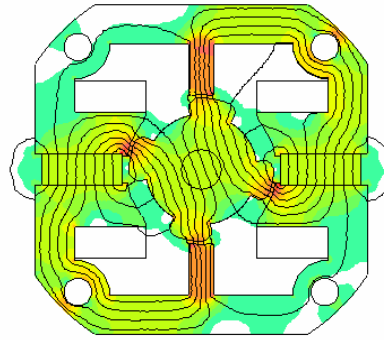
thetam = 150°

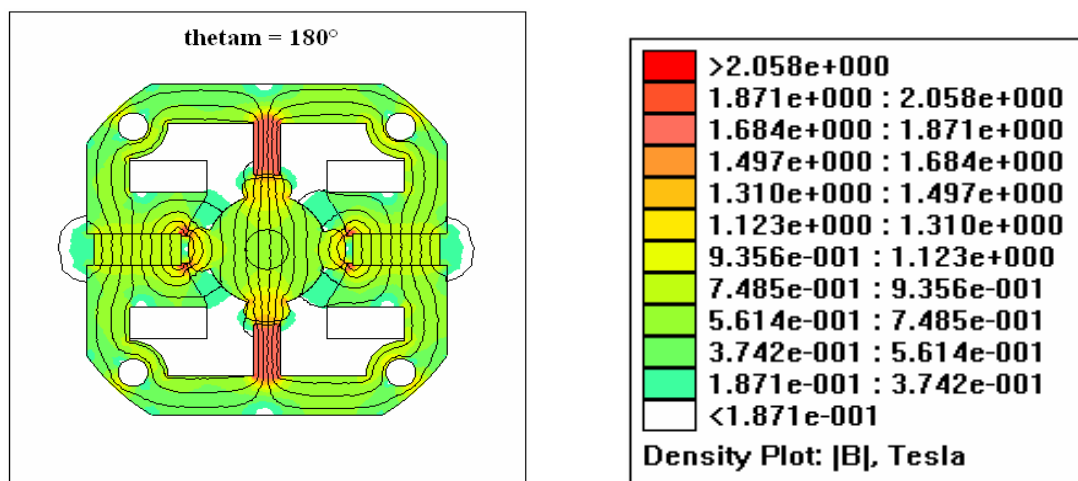


thetam = 160°



thetam = 170°





2.3.3 Simulazione a carico in regime sinusoidale

Al fine di analizzare il comportamento elettromagnetico del modello di microturbina progettato a carico in regime sinusoidale si è supposto di collegare l'avvolgimento di statore (costituito dalle due bobine a loro volta connesse in serie) ad un carico puramente resistivo; la corrente generata sarà quindi pari a:

$$i(\theta_m) = \frac{e(\theta_m)}{R}$$

Per prima cosa è stato stabilito il valore di resistenza di carico da alimentare mediante la tensione generata dalla microturbina, al fine di ottenere una corrente inferiore ai 0.5 [A] per evitare il riscaldamento del filo di rame, si è optato per un valore di carico di circa 100 [Ω]. Il valore massimo della corrente che teoricamente dovrebbe percorrere l'avvolgimento risulta pertanto:

$$I_{max} = \frac{E_0}{R} = \frac{15.5}{100} = 0.155 \quad [A]$$

Nella quale al posto di E_0 è stato inserito il valore massimo della tensione a vuoto ottenuto dalla precedente simulazione. Attraversando le bobine di statore la corrente generata produce una forza magnetomotrice, il cui valore in funzione dell'angolo meccanico θ_m è descritto dalla seguente equazione:

$$m(\theta_m) = -M \cos(2p\theta_m)$$

Nella quale il valore massimo risulta pari a:

$$M = 2 \cdot nc \cdot I_{max} = 2 \cdot 200 \cdot 0.155 = 62 \quad [A]$$

Sotto queste ipotesi si è proceduto all'analisi del modello in regime sinusoidale mediante software FEMM, ed i risultati ottenuti vengono riportati in Fig.2.82, nella quale si possono osservare le linee di flusso e l'intensità del campo \dot{B} nelle diverse regioni:

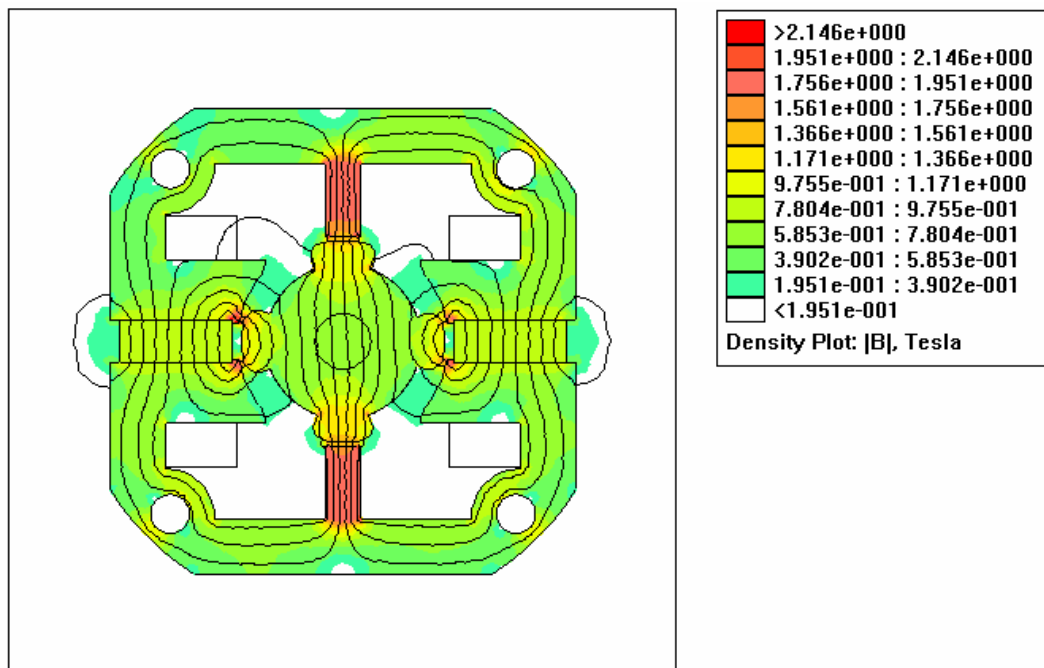


Fig. 2.74: Simulazione a regime sinusoidale del modello definitivo

Dalla figura sopra riportata si nota che la densità di campo di induzione magnetica presenta all'incirca la stessa distribuzione riscontrata dall'analisi del modello a vuoto, con la differenza che a regime sinusoidale nelle suddette ipotesi di lavoro i valori di $|\dot{B}|$ hanno subito un incremento di circa il 10% in tutte le zone del dominio.

Potenziale vettore magnetico

Si riporta nella sottostante figura l'andamento del potenziale vettore magnetico A_z in funzione della lunghezza del traferro, al fine di eseguirne il confronto con il grafico ottenuto dalla precedente simulazione a vuoto:

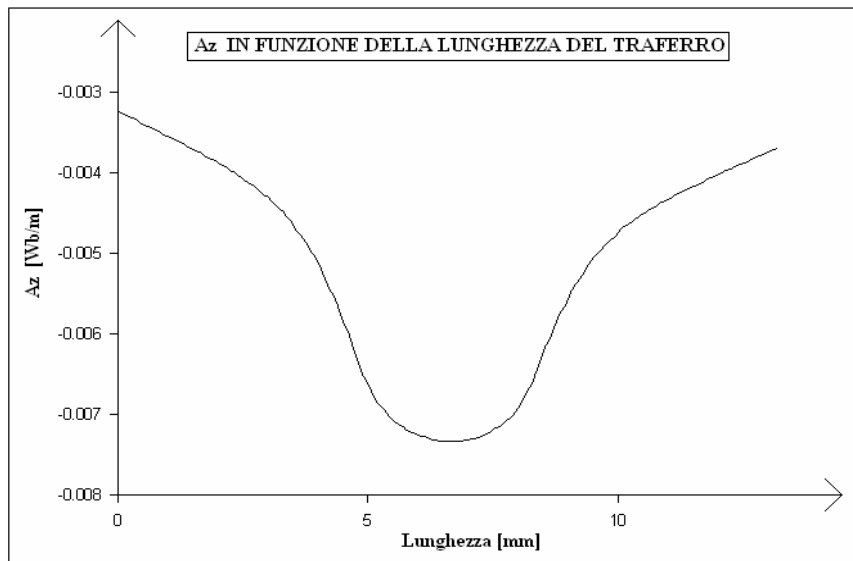


Fig. 2.75: Potenziale vettore A_z lungo il traferro a regime sinusoidale

Campo di induzione magnetica

La grandezza di maggior interesse è certamente il modulo del campo di induzione magnetica \vec{B} nei vari punti del traferro in prossimità dei magneti permanenti, poichè da esso dipendono i valori di coppia e di flusso concatenato. Se ne riporta in Fig.2.84 la forma d'onda ottenuta dalla simulazione mediante software FEMM:

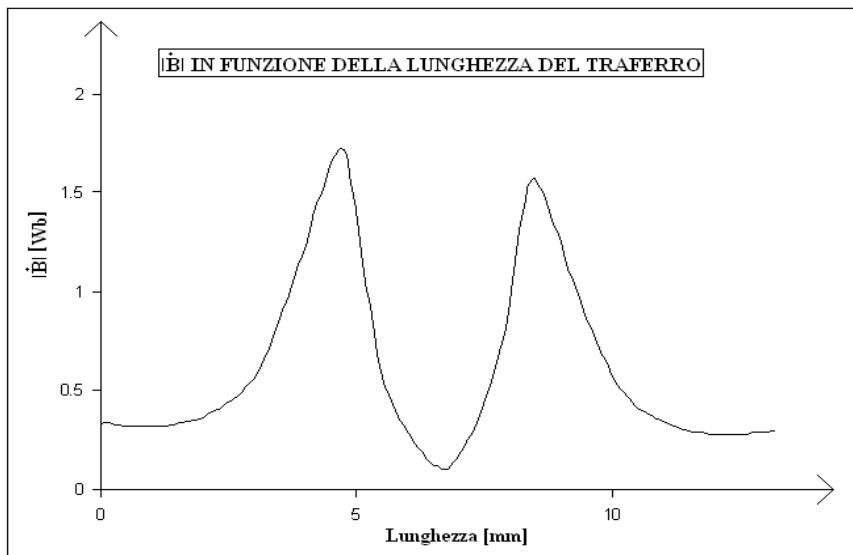


Fig. 2.76: $|\vec{B}|$ al traferro in regime sinusoidale (modello 3)

I valori di campo ottenuti a regime sinusoidale sono leggermente maggiori rispetto ai valori ottenuti dalla simulazione a vuoto, questo grazie al contributo della corrente di carico che aumenta il grado di saturazione del circuito magnetico.

É interessante osservare che il valore minimo di $|\dot{B}|$ pari a 0.2 [T] si ottiene proprio in corrispondenza dell'asse orizzontale che determina il punto di mezzo dei magneti permanenti.

Campo magnetico

Si riporta nella sottostante figura il modulo del campo magnetico \dot{H} in funzione della lunghezza del traferro, il quale presenta lo stesso andamento grafico dell'induzione magnetica.

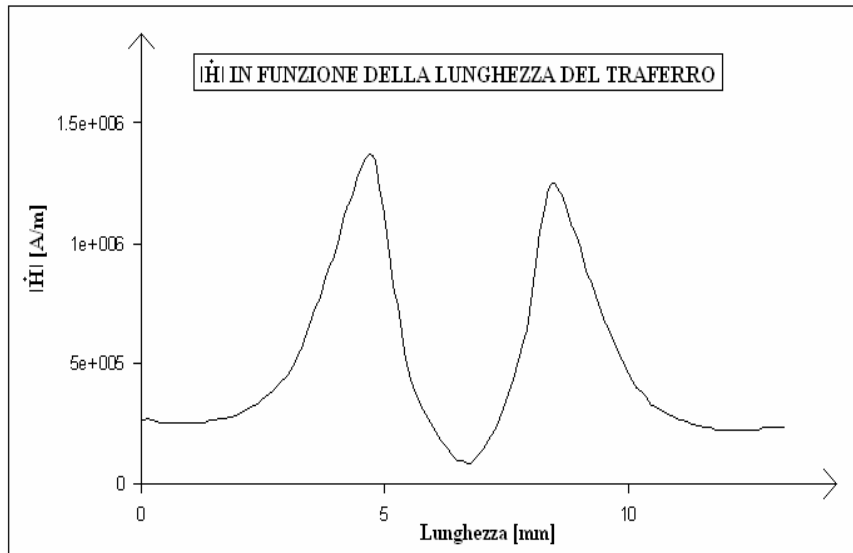


Fig. 2.77: $|\dot{H}|$ al traferro in regime sinusoidale (modello 3)

Flusso Concatenato

Il valore di flusso concatenato con l'avvolgimento di statore nelle suddette condizioni di carico, considerando il rotore nella sua posizione iniziale $\theta_m = 0$, è risultato pari a:

$$\Phi_c = 2.11 \cdot 10^{-3} \quad [Wb]$$

Coppia

La coppia agente sul rotore, determinata mediante l'ausilio del software FEMM applicando il metodo dei tensori degli sforzi di Maxwell, è risultata pari a:

$$T = 38.8 \quad [mNm]$$

Energia e Coenergia magnetica

I valori di energia e coenergia complessivamente messi in gioco nel volume totale occupato dal modello, facendo sempre riferimento al rotore fissato nella posizione iniziale $\theta_m = 0$, sono risultate pari a:

$$W = 0.6449 \quad [J]$$

$$W_c = 0.6621 \quad [J]$$

Analisi ricorsiva mediante script LUA

Si utilizza ora lo script in codice LUA precedentemente descritto al fine di eseguire una serie di simulazioni per diversi valori dell'angolo meccanico θ_m , in modo tale da poter costruire i grafici di flusso, coppia ecc.. in funzione della posizione del rotore espressa in radianti.

I risultati ottenuti dalle simulazioni del modello di microturbina progettato per diversi valori della posizione del rotore sono stati raccolti nella seguente tabella, dove sono stati riportati solo i valori di $\theta_m \leq 1.571$ [rad] per non appesantire la trattazione:

Tabella 2.16: Risultati dell' analisi in regime sinusoidale del modello 3

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	FMM [A]	Tensione [V]	Coppia [Nm]	Energia J]	Coenergia [J]
0	-2,11E-03	-62,023	15,504	3,88E-02	0,6449	0,6621
0,035	-5,20E-03	-61,420	15,079	3,89E-02	0,6457	0,6631
0,070	-8,13E-03	-59,621	14,360	4,26E-02	0,6472	0,6642
0,105	-1,08E-02	-56,661	13,362	4,09E-02	0,6492	0,6652
0,140	-1,31E-02	-52,599	12,103	3,89E-02	0,6516	0,6660
0,175	-1,52E-02	-47,513	10,609	3,42E-02	0,6540	0,6665
0,209	-1,69E-02	-41,502	8,909	3,07E-02	0,6561	0,6668
0,244	-1,85E-02	-34,683	7,035	3,00E-02	0,6575	0,6668
0,279	-1,99E-02	-27,189	5,024	2,61E-02	0,6583	0,6668
0,314	-2,10E-02	-19,166	2,915	2,52E-02	0,6585	0,6664
0,349	-2,19E-02	-10,770	0,750	1,92E-02	0,6584	0,6660
0,384	-2,23E-02	-2,165	-1,430	1,38E-02	0,6579	0,6653
0,419	-2,23E-02	6,483	-3,582	9,10E-03	0,6569	0,6643
0,454	-2,17E-02	15,005	-5,664	5,85E-03	0,6561	0,6633
0,489	-2,07E-02	23,234	-7,636	6,65E-03	0,6557	0,6623
0,524	-1,90E-02	31,012	-9,460	8,84E-03	0,6556	0,6614
0,559	-1,68E-02	38,185	-11,099	1,54E-02	0,6560	0,6609
0,593	-1,42E-02	44,616	-12,523	2,52E-02	0,6566	0,6608
0,628	-1,12E-02	50,178	-13,702	3,47E-02	0,6575	0,6611
0,663	-7,94E-03	54,763	-14,615	4,12E-02	0,6585	0,6619
0,698	-4,62E-03	58,283	-15,243	4,36E-02	0,6596	0,6629
0,733	-1,29E-03	60,668	-15,575	4,18E-02	0,6605	0,6640
0,768	1,98E-03	61,872	-15,604	3,94E-02	0,6612	0,6650
0,803	5,18E-03	61,872	-15,329	3,66E-02	0,6618	0,6659
0,838	8,32E-03	60,668	-14,755	3,23E-02	0,6623	0,6668
0,873	1,14E-02	58,283	-13,894	2,88E-02	0,6625	0,6674
0,908	1,42E-02	54,763	-12,763	2,70E-02	0,6622	0,6678
0,942	1,69E-02	50,178	-11,384	2,99E-02	0,6618	0,6680
0,977	1,92E-02	44,616	-9,783	3,30E-02	0,6614	0,6684
1,012	2,12E-02	38,185	-7,991	3,32E-02	0,6604	0,6684
1,047	2,26E-02	31,012	-6,044	2,95E-02	0,6597	0,6683
1,082	2,36E-02	23,234	-3,979	2,18E-02	0,6590	0,6680
1,117	2,40E-02	15,005	-1,837	1,25E-02	0,6584	0,6672
1,152	2,38E-02	6,483	0,341	1,70E-03	0,6575	0,6659
1,187	2,31E-02	-2,165	2,512	-5,40E-04	0,6568	0,6645
1,222	2,20E-02	-10,770	4,634	3,37E-03	0,6560	0,6633
1,257	2,05E-02	-19,166	6,667	1,04E-02	0,6554	0,6622
1,292	1,87E-02	-27,189	8,569	1,41E-02	0,6545	0,6614
1,326	1,68E-02	-34,683	10,305	2,09E-02	0,6540	0,6610
1,361	1,47E-02	-41,502	11,840	2,71E-02	0,6531	0,6609
1,396	1,24E-02	-47,513	13,144	3,25E-02	0,6520	0,6612
1,431	9,87E-03	-52,599	14,193	4,07E-02	0,6506	0,6618
1,466	7,11E-03	-56,661	14,966	4,88E-02	0,6499	0,6629
1,501	4,14E-03	-59,621	15,447	5,08E-02	0,6496	0,6641
1,536	1,02E-03	-61,420	15,628	4,88E-02	0,6498	0,6654
1,571	-2,15E-03	-62,023	15,504	3,68E-02	0,6504	0,6665

Grafico del flusso concatenato

Grazie ai valori raccolti nella precedente tabella si è potuto tracciare il grafico del flusso concatenato con l'avvolgimento di statore in funzione di θ_m , la cui forma d'onda viene riportata nella sottostante figura:

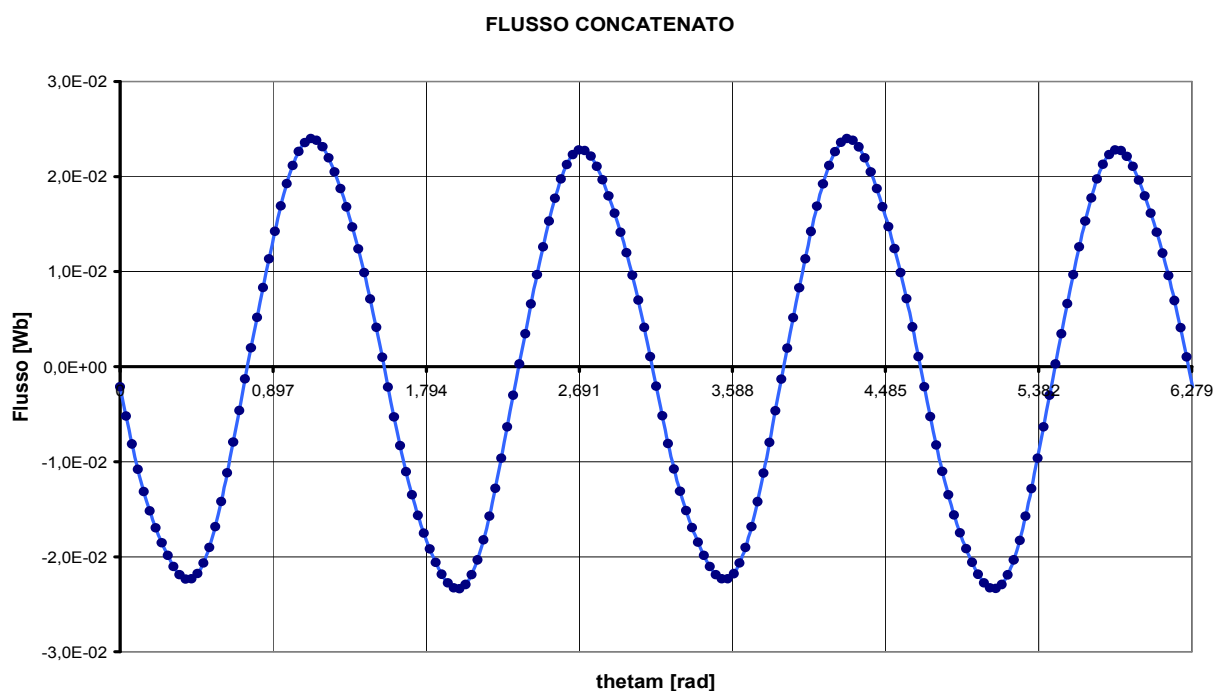


Fig. 2.78: Flusso concatenato in funzione di θ_m (modello definitivo in regime sinusoidale)

Grafico della forza magnetomotrice

Al fine di simulare il funzionamento in regime sinusoidale del modello di microturbina progettato si è ipotizzata la presenza d'una corrente di carico che attraversando gli avvolgimenti di statore sia tale da generare la forza magnetomotrice alternata qui di seguito riportata:

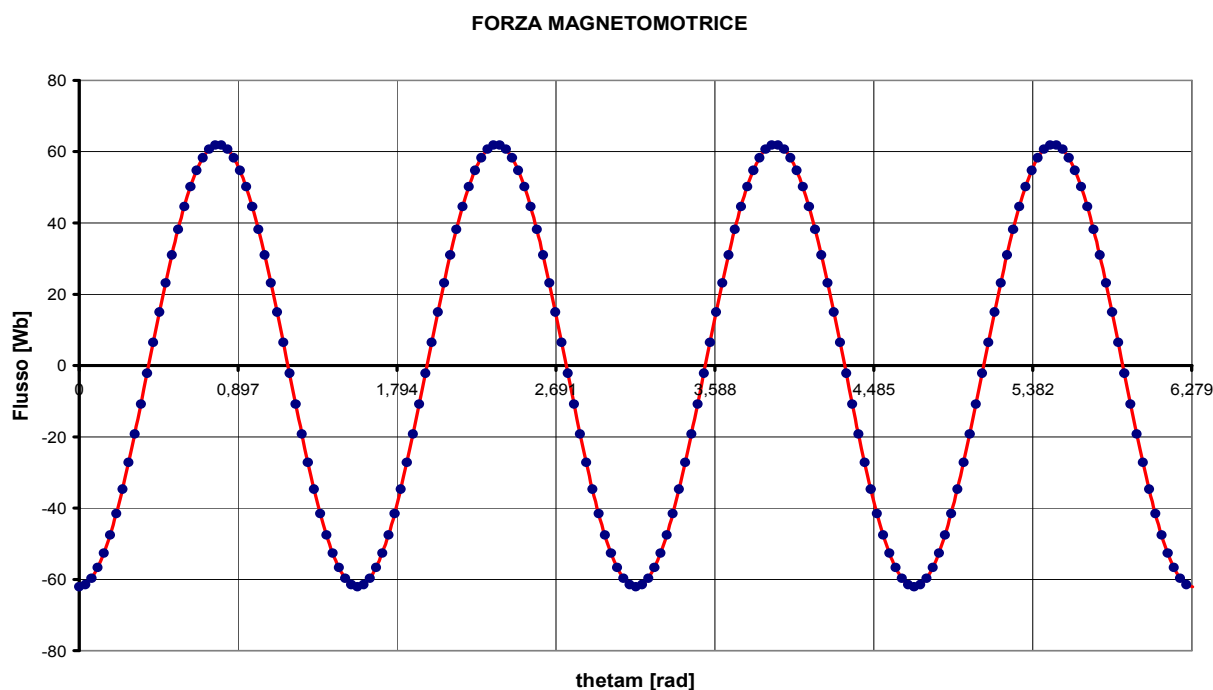


Fig. 2.79: Forza magnetomotrice in funzione di θ_m (regime sinusoidale)

Grafico della coppia

Come si può notare dalla figura qui di seguito riportata, la coppia agente sul rotore stimata mediante l' applicazione del metodo dei tensori degli sforzi di Maxwell risulta essere molto più oscillante rispetto ai modelli precedenti.

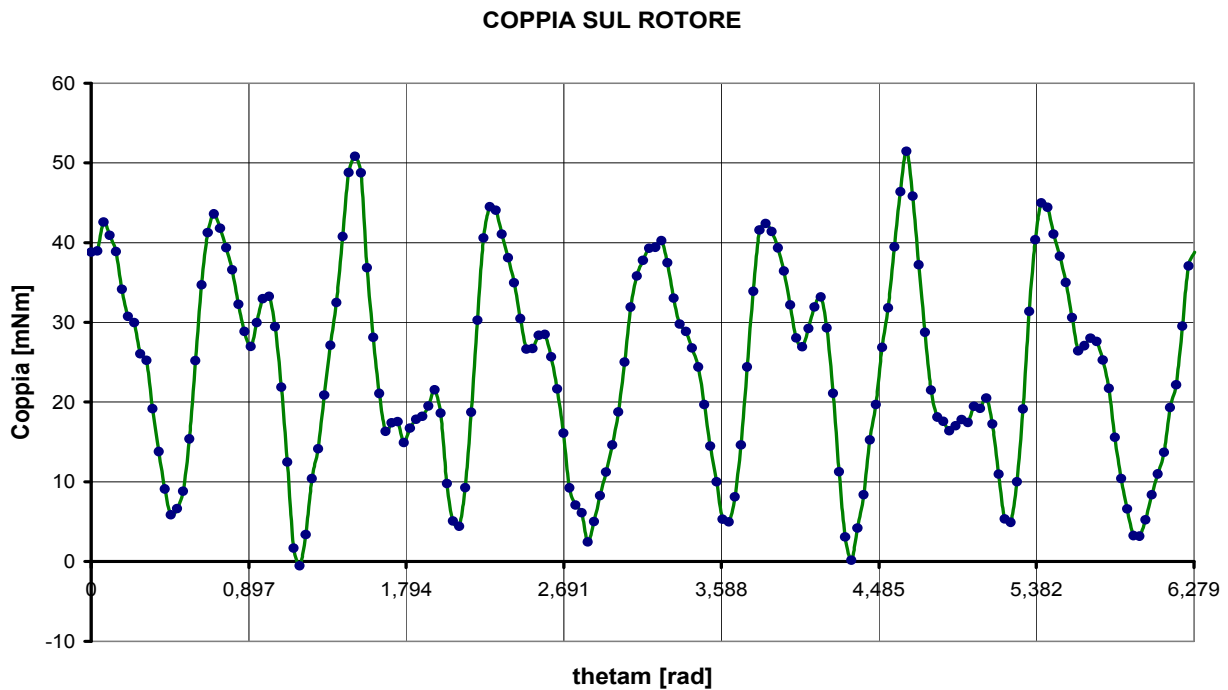


Fig. 2.80: Coppia in funzione di θ_m (modello definitivo in regime sinusoidale)

Grafico dell' energia magnetica

Come nei precedenti modelli si è ritenuto opportuno riportare il grafico dell' energia magnetica in funzione dell' angolo meccanico θ_m , al fine di individuare le posizioni del rotore per le quali vengono messi in gioco i valori massimi e minimi di energia.

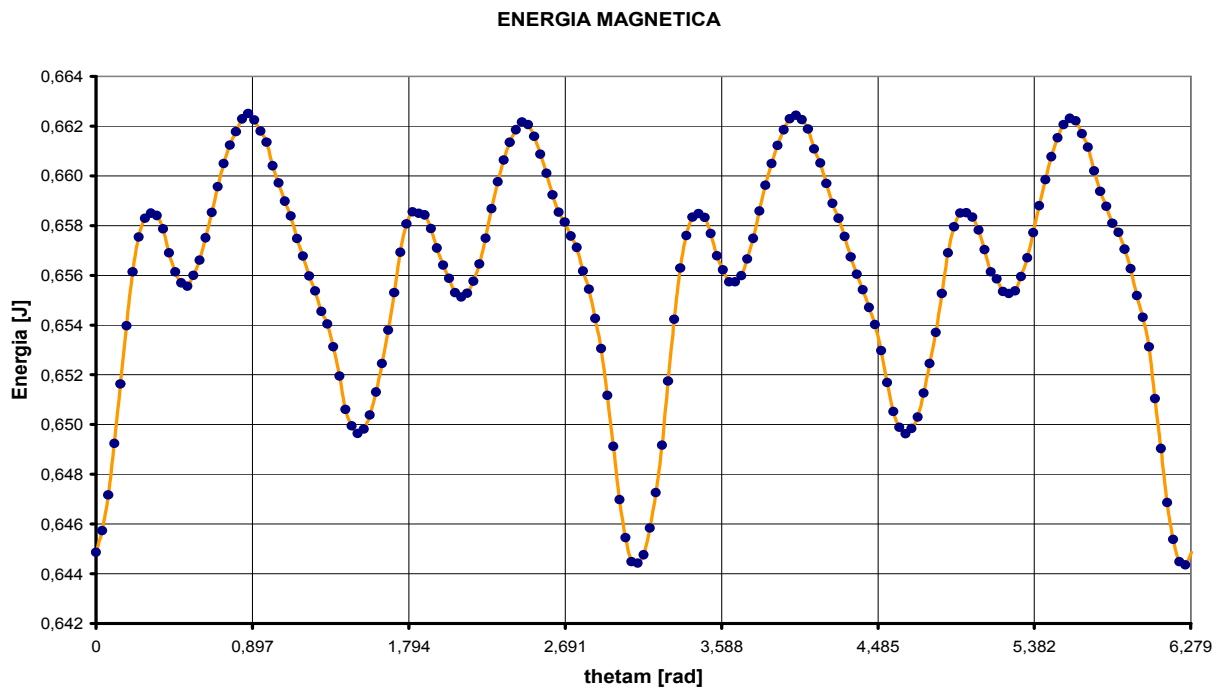


Fig. 2.81: Energia magnetica in funzione di θ_m (modello definitivo in regime sinusoidale)

Grafico della coenergia magnetica

Insieme all' energia si riporta nella sottostante figura la forma d' onda della coenergia magnetica messa in gioco nel volume occupato dal modello progettato, in funzione dell' angolo meccanico θ_m .

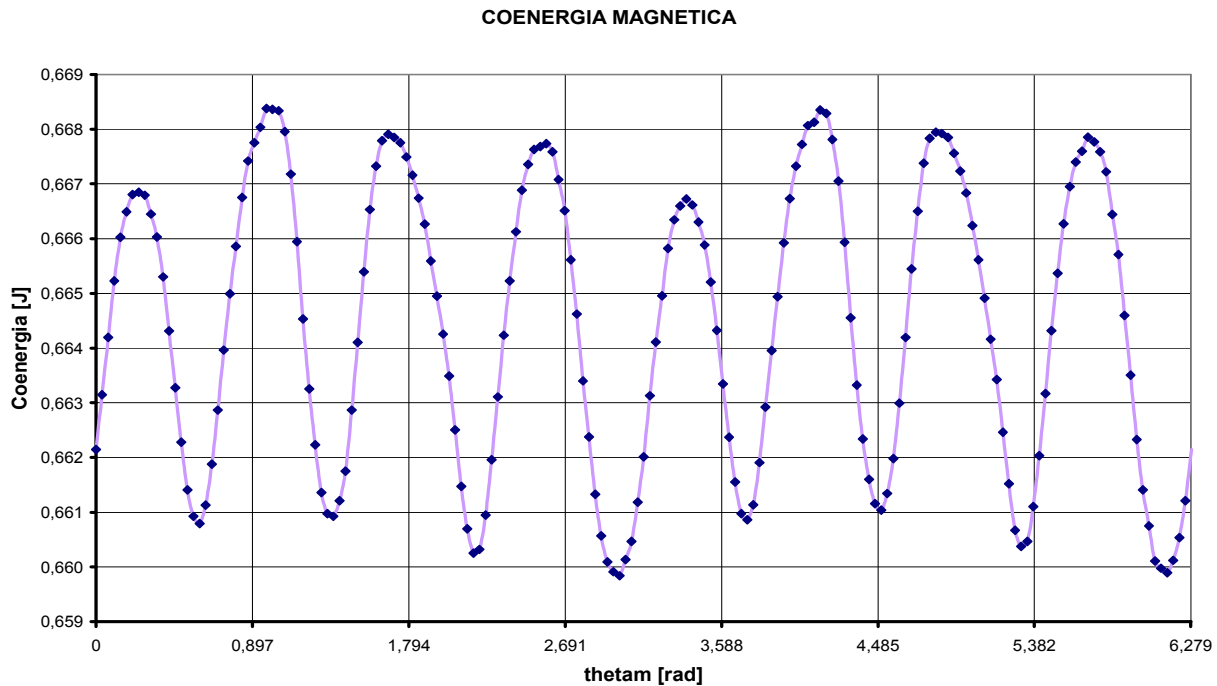


Fig. 2.82: Coenergia magnetica in funzione di θ_m (modello definitivo in regime sinusoidale)

Forza elettromotrice indotta

Si procede ora all' analisi della forza elettromotrice generata dal modello di microturbina progettato. Come al solito ci si è serviti dello script realizzato in codice MATLAB per effettuare la scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato con l' avvolgimento di statore; osservandone il grafico in Fig.2.78 si nota una forma d' onda piuttosto somigliante al grafico della funzione sinusoidale, pertanto è logico attendersi un contenuto armonico molto basso.

Il valore efficace e la fase delle prime cinque armoniche ottenute sono stati raccolti e riportati nella tabella sottostante:

Tabella 2.17: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$

ORDINE DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Veffk [Wb]	Phase [rad]
1	-2,90E-03	-2,28E-02	1,62E-02	-1,446
2	0	1,00E-03	7,00E-04	-1,531
3	-2,00E-04	0	1,00E-04	0,199
4	-1,00E-04	-4,00E-04	3,00E-04	-1,305
5	-1,00E-04	0	1,00E-04	-0,374

$$F = 1.62 \cdot 10^{-2} \text{ [Wb]}$$

$$F_{dis} = 9.42 \cdot 10^{-4} \text{ [Wb]}$$

$$THD = 5.81 \%$$

Nella seguente tabella si riportano i valori delle prime cinque armoniche nelle quali è stato scomposto il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$, sotto le ipotesi di funzionamento a carico in regime sinusoidale.

Tabella 2.18: Sviluppo in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ in regime sinusoidale

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Y1 [Wb]	Y2 [Wb]	Y3 [Wb]	Y4 [Wb]	Y5 [Wb]	Fo [Wb]
0	-2,11E-03	-2,90E-03	0	-2,00E-04	-1,00E-04	-1,00E-04	5,73E-04
0,035	-5,20E-03	-6,05E-03	2,76E-04	-1,83E-04	-2,97E-04	-7,66E-05	5,73E-04
0,070	-8,13E-03	-9,07E-03	5,30E-04	-1,34E-04	-4,03E-04	-1,74E-05	5,73E-04
0,105	-1,08E-02	-1,19E-02	7,43E-04	-6,18E-05	-3,87E-04	5,00E-05	5,73E-04
0,140	-1,31E-02	-1,45E-02	8,99E-04	2,09E-05	-2,54E-04	9,40E-05	5,73E-04
0,175	-1,52E-02	-1,69E-02	9,85E-04	1,00E-04	-4,27E-05	9,40E-05	5,73E-04
0,209	-1,69E-02	-1,89E-02	9,95E-04	1,62E-04	1,81E-04	5,00E-05	5,73E-04
0,244	-1,85E-02	-2,05E-02	9,27E-04	1,96E-04	3,50E-04	-1,74E-05	5,73E-04
0,279	-1,99E-02	-2,18E-02	7,88E-04	1,96E-04	4,12E-04	-7,66E-05	5,73E-04
0,314	-2,10E-02	-2,26E-02	5,88E-04	1,62E-04	3,49E-04	-1,00E-04	5,73E-04
0,349	-2,19E-02	-2,30E-02	3,42E-04	9,99E-05	1,80E-04	-7,66E-05	5,73E-04
0,384	-2,23E-02	-2,29E-02	6,95E-05	2,08E-05	-4,36E-05	-1,73E-05	5,73E-04
0,419	-2,23E-02	-2,24E-02	-2,08E-04	-6,19E-05	-2,54E-04	5,01E-05	5,73E-04
0,454	-2,17E-02	-2,14E-02	-4,70E-04	-1,34E-04	-3,88E-04	9,40E-05	5,73E-04
0,489	-2,07E-02	-2,01E-02	-6,95E-04	-1,83E-04	-4,03E-04	9,39E-05	5,73E-04
0,524	-1,90E-02	-1,83E-02	-8,66E-04	-2,00E-04	-2,96E-04	4,99E-05	5,73E-04
0,559	-1,68E-02	-1,62E-02	-9,70E-04	-1,83E-04	-9,91E-05	-1,75E-05	5,73E-04
0,593	-1,42E-02	-1,37E-02	-9,99E-04	-1,34E-04	1,28E-04	-7,67E-05	5,73E-04
0,628	-1,12E-02	-1,11E-02	-9,51E-04	-6,17E-05	3,16E-04	-1,00E-04	5,73E-04
0,663	-7,94E-03	-8,14E-03	-8,29E-04	2,11E-05	4,08E-04	-7,65E-05	5,73E-04
0,698	-4,62E-03	-5,07E-03	-6,42E-04	1,00E-04	3,76E-04	-1,72E-05	5,73E-04
0,733	-1,29E-03	-1,90E-03	-4,06E-04	1,62E-04	2,30E-04	5,01E-05	5,73E-04
0,768	1,98E-03	1,31E-03	-1,39E-04	1,96E-04	1,36E-05	9,40E-05	5,73E-04
0,803	5,18E-03	4,49E-03	1,40E-04	1,96E-04	-2,07E-04	9,39E-05	5,73E-04
0,838	8,31E-03	7,58E-03	4,07E-04	1,62E-04	-3,64E-04	4,99E-05	5,73E-04
0,873	1,13E-02	1,05E-02	6,43E-04	9,98E-05	-4,11E-04	-1,75E-05	5,73E-04
0,908	1,42E-02	1,33E-02	8,29E-04	2,07E-05	-3,33E-04	-7,67E-05	5,73E-04
0,943	1,69E-02	1,58E-02	9,51E-04	-6,20E-05	-1,54E-04	-1,00E-04	5,73E-04
0,977	1,92E-02	1,79E-02	9,99E-04	-1,34E-04	7,25E-05	-7,65E-05	5,73E-04
1,012	2,12E-02	1,98E-02	9,70E-04	-1,83E-04	2,77E-04	-1,72E-05	5,73E-04
1,047	2,26E-02	2,12E-02	8,66E-04	-2,00E-04	3,97E-04	5,02E-05	5,73E-04
1,082	2,36E-02	2,22E-02	6,94E-04	-1,83E-04	3,96E-04	9,40E-05	5,73E-04
1,117	2,40E-02	2,28E-02	4,69E-04	-1,34E-04	2,75E-04	9,39E-05	5,73E-04
1,152	2,38E-02	2,30E-02	2,07E-04	-6,15E-05	7,06E-05	4,98E-05	5,73E-04
1,187	2,31E-02	2,27E-02	-7,07E-05	2,12E-05	-1,55E-04	-1,76E-05	5,73E-04
1,222	2,20E-02	2,19E-02	-3,43E-04	1,00E-04	-3,34E-04	-7,68E-05	5,73E-04
1,257	2,05E-02	2,08E-02	-5,89E-04	1,62E-04	-4,11E-04	-1,00E-04	5,73E-04
1,292	1,87E-02	1,92E-02	-7,89E-04	1,96E-04	-3,64E-04	-7,64E-05	5,73E-04
1,327	1,68E-02	1,73E-02	-9,28E-04	1,96E-04	-2,05E-04	-1,71E-05	5,73E-04
1,361	1,47E-02	1,50E-02	-9,95E-04	1,62E-04	1,55E-05	5,02E-05	5,73E-04
1,396	1,24E-02	1,24E-02	-9,85E-04	9,97E-05	2,32E-04	9,41E-05	5,73E-04
1,431	9,88E-03	9,61E-03	-8,98E-04	2,06E-05	3,77E-04	9,39E-05	5,73E-04
1,466	7,11E-03	6,61E-03	-7,42E-04	-6,21E-05	4,08E-04	4,98E-05	5,73E-04
1,501	4,14E-03	3,48E-03	-5,29E-04	-1,34E-04	3,15E-04	-1,77E-05	5,73E-04
1,536	1,02E-03	2,88E-04	-2,74E-04	-1,83E-04	1,26E-04	-7,68E-05	5,73E-04
1,571	-2,15E-03	-2,91E-03	1,23E-06	-2,00E-04	-1,01E-04	-1,00E-04	5,73E-04

Nella seguente Fig.2.91 viene riportata la scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato messo in gioco dal modello di microturbina progettato funzionante a carico in regime sinusoidale.

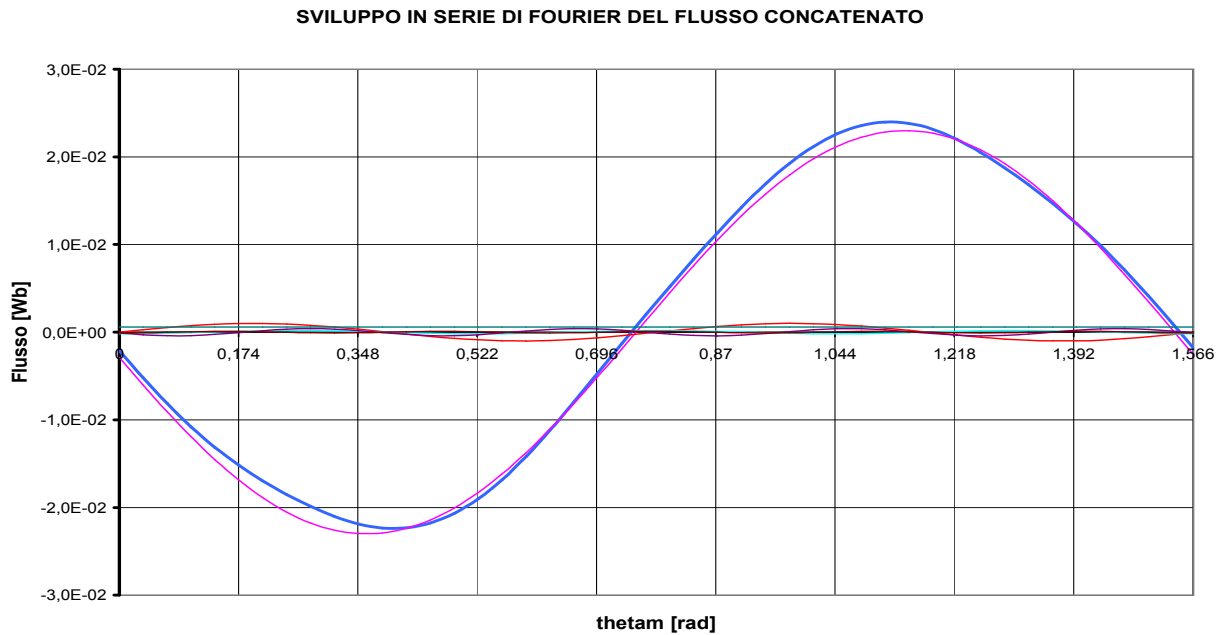


Fig. 2.83: Scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato in regime sinusoidale

Dopo aver eseguito lo sviluppo in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ è immediato ricostruire la forma d'onda della forza elettromotrice generata semplicemente applicando l'equazione (2.15) ovvero:

$$e(t) = \sum_{k=1}^n [k \cdot \omega \cdot a_k \sin(k\omega t) - k \cdot \omega \cdot b_k \cdot \cos(k\omega t)]$$

La forma d'onda della tensione indotta così determinata viene riportata nella figura sottostante in funzione dell'angolo meccanico θ_m :

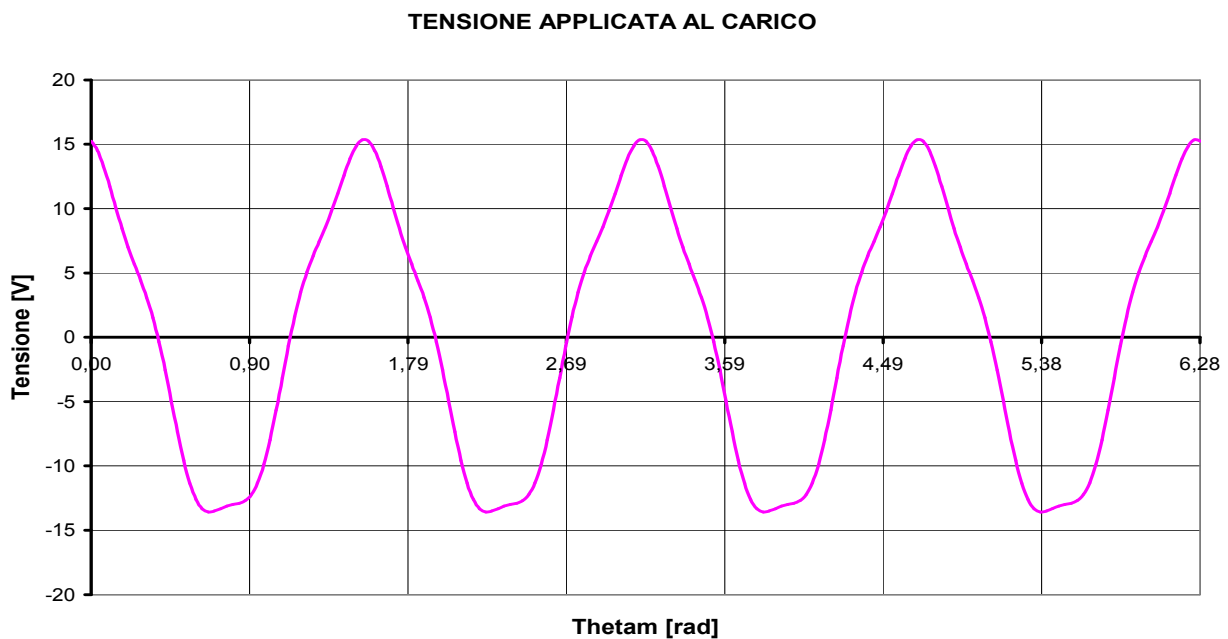


Fig. 2.84: Forza elettromotrice generata (modello definitivo)

2.3.4 Simulazione a carico in regime continuo

La microturbina progettata dovrebbe in realtà funzionare da batteria, ovvero essere in grado di alimentare un carico mediante l'applicazione di una tensione continua, di valore circa pari a 8 [V]. Osservando le precedenti simulazioni appare evidente che la forza elettromotrice generata presenta forma d'onda sinusoidale, pertanto è necessario progettare un raddrizzatore da inserire tra microturbina e carico, al fine di convertire in continua la tensione alternata generata.

Le procedure seguite per il progetto e la costruzione del convertitore AC/DC verranno descritte dettagliatamente nei successivi capitoli, mentre ci si pone ora l'obiettivo di analizzare il comportamento del modello di microgeneratore realizzato in presenza di raddrizzatore.

Innanzitutto per alimentare un carico alla tensione nominale di circa 7 [V] è necessario prelevare la forza elettromotrice generata direttamente da ciascuno degli avvolgimenti di statore, i quali non dovranno pertanto essere connessi in serie.

Il passo successivo consiste nell'ipotizzare un valore ragionevole di resistenza di carico, la quale non deve essere troppo elevata al fine di garantire la circolazione di una corrente misurabile, e neppure talmente bassa da essere equivalente ad un cortocircuito.

Sulla base di queste considerazioni si è optato per un valore di resistenza di carico di circa 1000 [Ω], pertanto la corrente che attraversa il carico in uscita dal raddrizzatore sarà circa pari a:

$$I_R = \frac{V_n}{R} = \frac{8}{1000} = 0.008 \quad [A]$$

Ipotizzando una corrente di circa 8 [mA] sul carico, ciascuno dei due avvolgimenti saranno caratterizzati da una forza magnetomotrice di valore costante circa pari a:

$$FMM = n_c \cdot I_R = 200 \cdot 0.008 = 1.6 \quad [A]$$

Sulla base di queste ipotesi è stata eseguita la simulazione a carico in regime continuo del modello di microturbina progettato, ovvero imponendo una forza magnetomotrice costante nello spazio occupato dagli avvolgimenti. Il risultato della simulazione è stato riportato nella sottostante figura, nella quale si possono notare le linee di forza del campo \vec{B} :

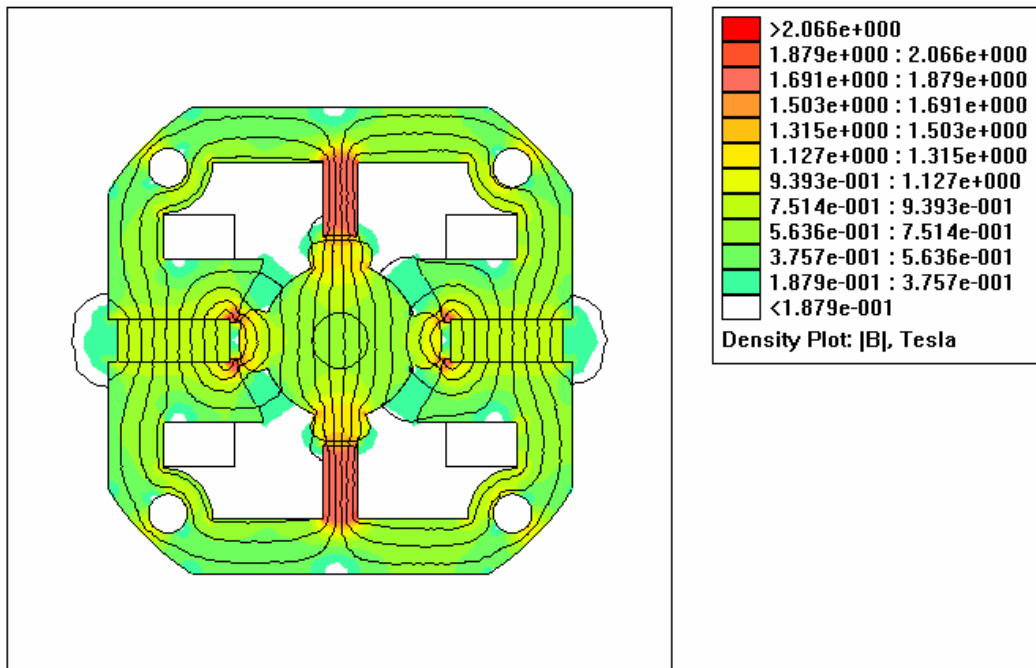


Fig. 2.85: Simulazione a carico del modello 3 (regime continuo)

Analisi ricorsiva mediante script LUA

Si procede ora all' analisi del modello progettato funzionante a carico in regime continuo per diverse posizioni del rotore; al fine di eseguire un elevato numero di simulazioni per diversi valori dell' angolo meccanico θ_m è stato impiegato il medesimo script in codice LUA utilizzato nei precedenti modelli. I risultati ottenuti sono stati riportati nelle seguente tabella:

Tabella 2.19: Risultati dell' analisi in regime continuo del modello 3

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Tensione [V]	FMM [A]	Coppia [Nm]	Energia [J]	Coenergia [J]
0	-6,22E-05	7,752	1,6	1,19E-03	0,6447	0,6617
0,070	-6,17E-03	7,415	1,6	7,71E-03	0,6457	0,6620
0,140	-1,14E-02	6,503	1,6	1,09E-02	0,6493	0,6627
0,209	-1,56E-02	5,087	1,6	9,42E-03	0,6537	0,6634
0,279	-1,90E-02	3,278	1,6	1,03E-02	0,6564	0,6642
0,349	-2,16E-02	1,214	1,6	7,91E-03	0,6577	0,6650
0,419	-2,26E-02	-0,944	1,6	-9,62E-04	0,6575	0,6652
0,489	-2,16E-02	-3,028	1,6	-7,58E-03	0,6574	0,6649
0,559	-1,84E-02	-4,878	1,6	-7,30E-03	0,6583	0,6644
0,628	-1,34E-02	-6,350	1,6	2,65E-03	0,6597	0,6643
0,698	-7,25E-03	-7,330	1,6	5,66E-03	0,6608	0,6646
0,768	-8,19E-04	-7,742	1,6	-2,73E-04	0,6612	0,6647
0,838	5,61E-03	-7,555	1,6	-6,58E-03	0,6609	0,6645
0,908	1,19E-02	-6,782	1,6	-7,79E-03	0,6598	0,6640
0,977	1,75E-02	-5,483	1,6	6,55E-03	0,6586	0,6640
1,047	2,14E-02	-3,760	1,6	1,20E-02	0,6574	0,6647
1,117	2,34E-02	-1,745	1,6	1,17E-03	0,6571	0,6652
1,187	2,32E-02	0,405	1,6	-1,06E-02	0,6568	0,6646
1,257	2,11E-02	2,523	1,6	-3,06E-03	0,6568	0,6641
1,326	1,80E-02	4,446	1,6	2,12E-03	0,6563	0,6639
1,396	1,40E-02	6,025	1,6	7,35E-03	0,6543	0,6643
1,466	9,04E-03	7,136	1,6	1,63E-02	0,6517	0,6651
1,536	3,11E-03	7,695	1,6	1,15E-02	0,6503	0,6659
1,606	-3,19E-03	7,658	1,6	-8,77E-03	0,6504	0,6660
1,676	-9,14E-03	7,027	1,6	-1,53E-02	0,6517	0,6651
1,745	-1,41E-02	5,852	1,6	-6,70E-03	0,6543	0,6643
1,815	-1,80E-02	4,223	1,6	-1,49E-03	0,6562	0,6641
1,885	-2,12E-02	2,268	1,6	4,84E-03	0,6570	0,6644
1,955	-2,33E-02	0,136	1,6	1,15E-02	0,6571	0,6649
2,025	-2,35E-02	-2,006	1,6	-1,07E-03	0,6571	0,6654
2,094	-2,15E-02	-3,992	1,6	-1,25E-02	0,6574	0,6649
2,164	-1,76E-02	-5,670	1,6	-7,49E-03	0,6584	0,6641
2,234	-1,20E-02	-6,908	1,6	5,71E-03	0,6597	0,6640
2,304	-5,74E-03	-7,611	1,6	5,12E-03	0,6608	0,6644
2,374	6,84E-04	-7,724	1,6	-1,42E-03	0,6610	0,6645
2,443	7,11E-03	-7,239	1,6	-7,06E-03	0,6606	0,6643
2,513	1,32E-02	-6,192	1,6	-4,69E-03	0,6593	0,6639
2,583	1,82E-02	-4,667	1,6	6,32E-03	0,6578	0,6639
2,653	2,14E-02	-2,779	1,6	7,61E-03	0,6569	0,6643
2,723	2,24E-02	-0,677	1,6	-7,99E-04	0,6570	0,6647
2,793	2,14E-02	1,479	1,6	-5,17E-03	0,6569	0,6644
2,862	1,88E-02	3,519	1,6	-1,07E-02	0,6560	0,6637
2,932	1,55E-02	5,287	1,6	-9,70E-03	0,6535	0,6630
3,002	1,13E-02	6,645	1,6	-8,46E-03	0,6491	0,6624
3,072	6,07E-03	7,489	1,6	-2,43E-03	0,6456	0,6619
3,142	-6,10E-05	7,752	1,6	5,39E-04	0,6446	0,6616

Grafico del flusso concatenato

Si riporta nella sottostante figura l' andamento del flusso concatenato in funzione della posizione del rotore descritta dall' angolo meccanico θ_m , nelle ipotesi di funzionamento a carico in regime continuo:

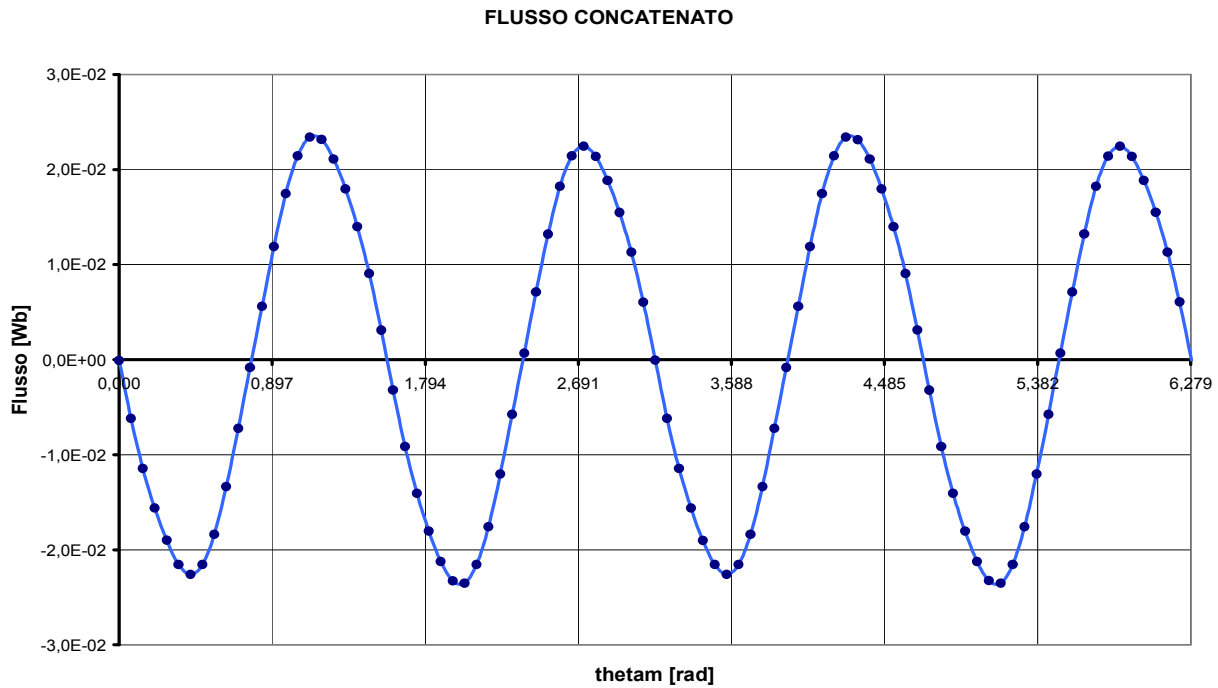


Fig. 2.86: Flusso concatenato in funzione di θ_m : modello 3 in regime continuo

Grafico della coppia

Nella figura sottostante si può osservare l' andamento della coppia agente sul rotore stimata mediante il metodo del tensore degli sforzi di Maxwell, ottenuta per diverse posizioni del rotore:

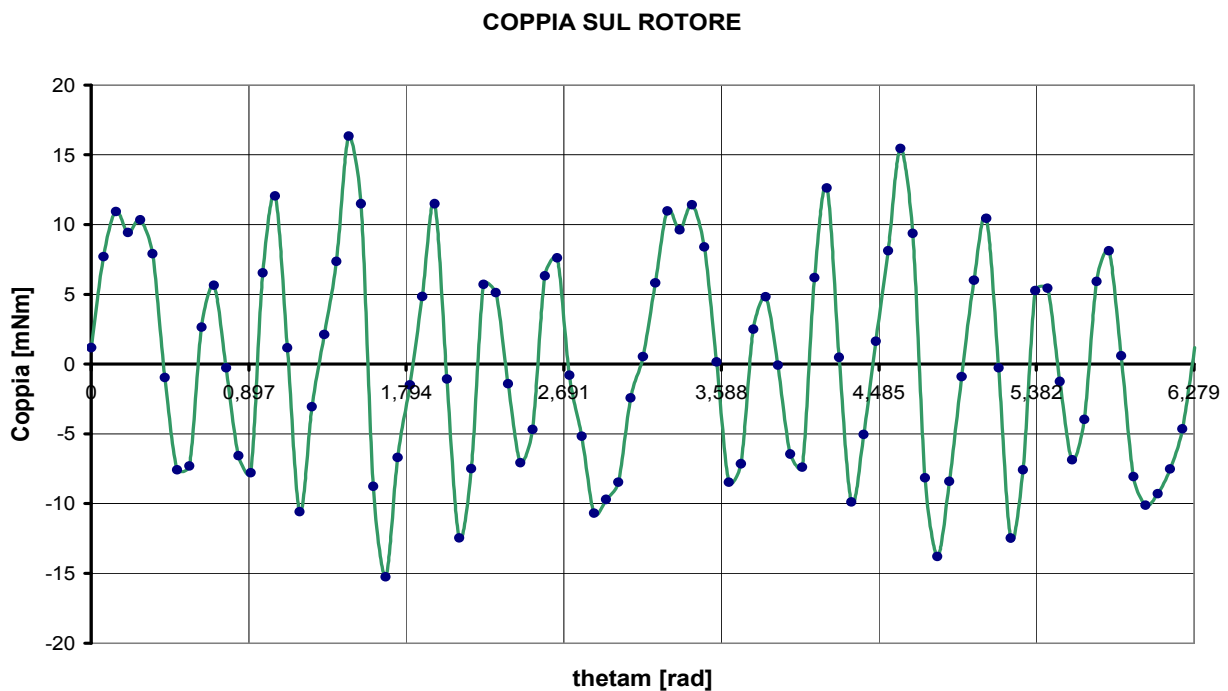


Fig. 2.87: Coppia in funzione di θ_m : modello 3 in regime continuo

Grafico dell' energia magnetica

Viene riportata nella sottostante figura il grafico dell' energia magnetica in funzione di θ_m nelle condizioni di funzionamento a carico in regime continuo.

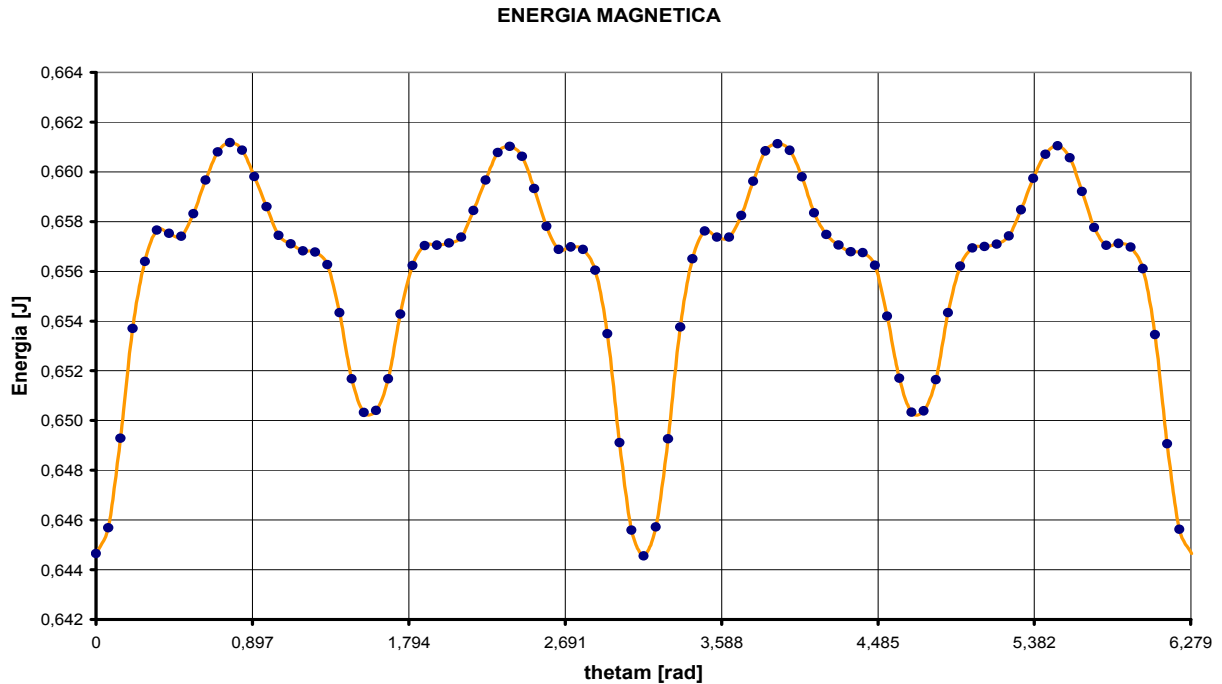


Fig. 2.88: Energia magnetica in funzione di θ_m : modello 3 in regime continuo

Grafico della coenergia magnetica

Si riporta nella sottostante figura l' andamento della coenergia magnetica messa in gioco nel volume totale occupato dal modello progettato, come sempre per diversi valori della posizione angolare del rotore espressa da θ_m .

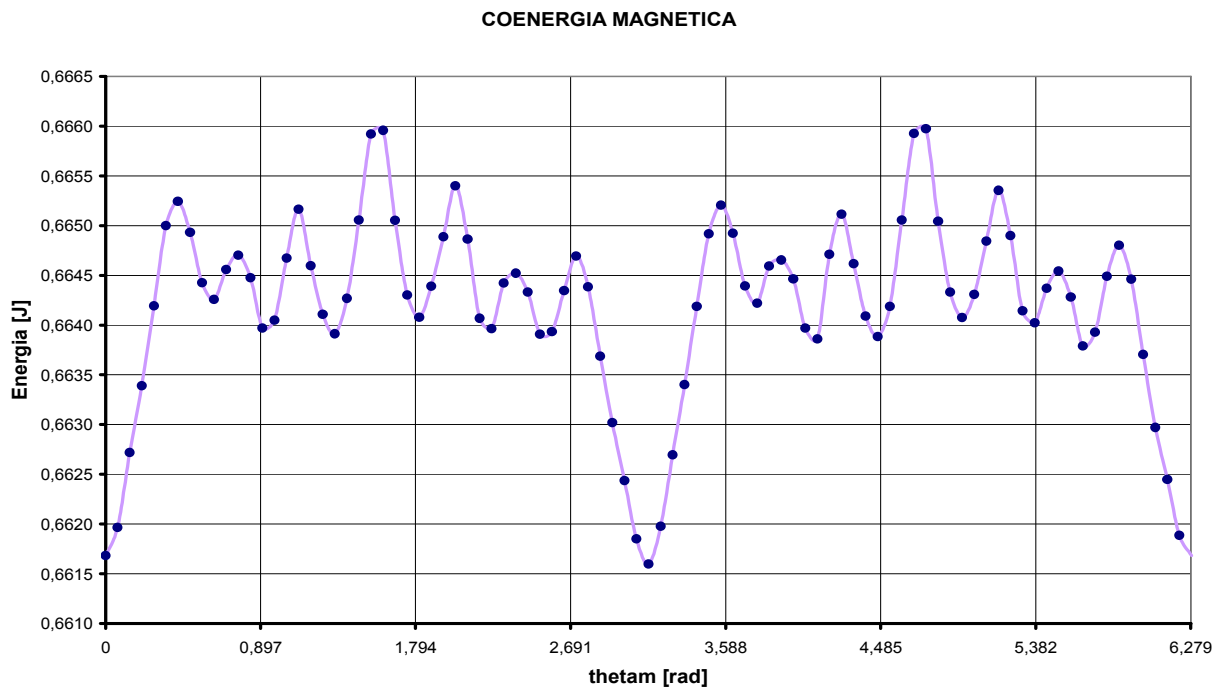


Fig. 2.89: Coenergia magnetica in funzione di θ_m : modello 3 in regime continuo

Forza elettromotrice indotta

Al fine di stimare la forma d'onda della forza elettromotrice generata dal modello nelle ipotesi di funzionamento a carico in regime continuo si è proceduto alla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato, in modo tale da determinare l'ampiezza dell'armonica fondamentale. I risultati ottenuti vengono qui di seguito riportati:

Tabella 2.20: Sviluppo in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ in regime continuo

Thetam [rad]	Flusso [Wb]	Y1 [Wb]	Y2 [Wb]	Y3 [Wb]	Y4 [Wb]	Y5 [Wb]	Fo [Wb]
0	-6,22E-05	-3,95E-04	-3,19E-05	-3,80E-05	-3,00E-05	-8,20E-06	4,28E-04
0,035	-3,17E-03	-3,56E-03	2,45E-04	-3,47E-05	-2,37E-04	-6,28E-06	4,28E-04
0,070	-6,17E-03	-6,66E-03	5,03E-04	-2,54E-05	-3,73E-04	-1,42E-06	4,28E-04
0,105	-8,95E-03	-9,64E-03	7,22E-04	-1,17E-05	-3,95E-04	4,10E-06	4,28E-04
0,140	-1,14E-02	-1,24E-02	8,85E-04	3,98E-06	-2,97E-04	7,71E-06	4,28E-04
0,175	-1,36E-02	-1,50E-02	9,79E-04	1,90E-05	-1,09E-04	7,70E-06	4,28E-04
0,209	-1,56E-02	-1,72E-02	9,98E-04	3,07E-05	1,13E-04	4,10E-06	4,28E-04
0,244	-1,74E-02	-1,91E-02	9,39E-04	3,72E-05	3,00E-04	-1,43E-06	4,28E-04
0,279	-1,90E-02	-2,07E-02	8,08E-04	3,72E-05	3,95E-04	-6,28E-06	4,28E-04
0,314	-2,04E-02	-2,18E-02	6,13E-04	3,07E-05	3,71E-04	-8,20E-06	4,28E-04
0,349	-2,16E-02	-2,25E-02	3,72E-04	1,90E-05	2,34E-04	-6,28E-06	4,28E-04
0,384	-2,23E-02	-2,28E-02	1,01E-04	3,96E-06	2,57E-05	-1,42E-06	4,28E-04
0,419	-2,26E-02	-2,26E-02	-1,77E-04	-1,18E-05	-1,90E-04	4,11E-06	4,28E-04
0,454	-2,23E-02	-2,20E-02	-4,42E-04	-2,54E-05	-3,49E-04	7,71E-06	4,28E-04
0,489	-2,16E-02	-2,10E-02	-6,72E-04	-3,47E-05	-4,01E-04	7,70E-06	4,28E-04
0,524	-2,02E-02	-1,95E-02	-8,50E-04	-3,80E-05	-3,31E-04	4,09E-06	4,28E-04
0,559	-1,84E-02	-1,77E-02	-9,63E-04	-3,47E-05	-1,61E-04	-1,43E-06	4,28E-04
0,593	-1,61E-02	-1,56E-02	-1,00E-03	-2,54E-05	5,82E-05	-6,29E-06	4,28E-04
0,628	-1,34E-02	-1,31E-02	-9,61E-04	-1,17E-05	2,60E-04	-8,20E-06	4,28E-04
0,663	-1,04E-02	-1,04E-02	-8,47E-04	4,00E-06	3,82E-04	-6,27E-06	4,28E-04
0,698	-7,25E-03	-7,42E-03	-6,67E-04	1,90E-05	3,89E-04	-1,41E-06	4,28E-04
0,733	-4,04E-03	-4,35E-03	-4,35E-04	3,08E-05	2,77E-04	4,11E-06	4,28E-04
0,768	-8,19E-04	-1,19E-03	-1,70E-04	3,72E-05	8,09E-05	7,71E-06	4,28E-04
0,803	2,39E-03	1,99E-03	1,08E-04	3,72E-05	-1,40E-04	7,70E-06	4,28E-04
0,838	5,61E-03	5,13E-03	3,78E-04	3,07E-05	-3,18E-04	4,09E-06	4,28E-04
0,873	8,79E-03	8,18E-03	6,19E-04	1,90E-05	-3,99E-04	-1,44E-06	4,28E-04
0,908	1,19E-02	1,11E-02	8,12E-04	3,93E-06	-3,59E-04	-6,29E-06	4,28E-04
0,943	1,48E-02	1,37E-02	9,41E-04	-1,18E-05	-2,10E-04	-8,20E-06	4,28E-04
0,977	1,75E-02	1,61E-02	9,98E-04	-2,55E-05	2,64E-06	-6,27E-06	4,28E-04
1,012	1,97E-02	1,82E-02	9,78E-04	-3,47E-05	2,15E-04	-1,41E-06	4,28E-04
1,047	2,14E-02	1,99E-02	8,82E-04	-3,80E-05	3,62E-04	4,11E-06	4,28E-04
1,082	2,27E-02	2,13E-02	7,17E-04	-3,47E-05	3,99E-04	7,71E-06	4,28E-04
1,117	2,34E-02	2,22E-02	4,97E-04	-2,54E-05	3,14E-04	7,70E-06	4,28E-04
1,152	2,35E-02	2,27E-02	2,38E-04	-1,17E-05	1,35E-04	4,08E-06	4,28E-04
1,187	2,32E-02	2,28E-02	-3,89E-05	4,02E-06	-8,61E-05	-1,44E-06	4,28E-04
1,222	2,23E-02	2,24E-02	-3,13E-04	1,90E-05	-2,81E-04	-6,29E-06	4,28E-04
1,257	2,11E-02	2,16E-02	-5,63E-04	3,08E-05	-3,90E-04	-8,20E-06	4,28E-04
1,292	1,96E-02	2,03E-02	-7,69E-04	3,72E-05	-3,81E-04	-6,27E-06	4,28E-04
1,327	1,80E-02	1,87E-02	-9,16E-04	3,72E-05	-2,56E-04	-1,40E-06	4,28E-04
1,361	1,61E-02	1,67E-02	-9,91E-04	3,07E-05	-5,30E-05	4,12E-06	4,28E-04
1,396	1,40E-02	1,43E-02	-9,90E-04	1,89E-05	1,66E-04	7,71E-06	4,28E-04
1,431	1,17E-02	1,17E-02	-9,12E-04	3,91E-06	3,34E-04	7,70E-06	4,28E-04
1,466	9,04E-03	8,90E-03	-7,64E-04	-1,18E-05	4,01E-04	4,08E-06	4,28E-04
1,501	6,18E-03	5,89E-03	-5,56E-04	-2,55E-05	3,46E-04	-1,45E-06	4,28E-04
1,536	3,11E-03	2,77E-03	-3,05E-04	-3,47E-05	1,86E-04	-6,30E-06	4,28E-04
1,571	-3,79E-05	-4,09E-04	-3,07E-05	-3,80E-05	-3,10E-05	-8,20E-06	4,28E-04

Nella seguente figura si può osservare il contenuto armonico della forma d'onda caratteristica del flusso concatenato ottenuta a carico in regime continuo, dal quale si nota come la prima armonica sia quasi coincidente con il grafico del flusso in funzione di θ_m .

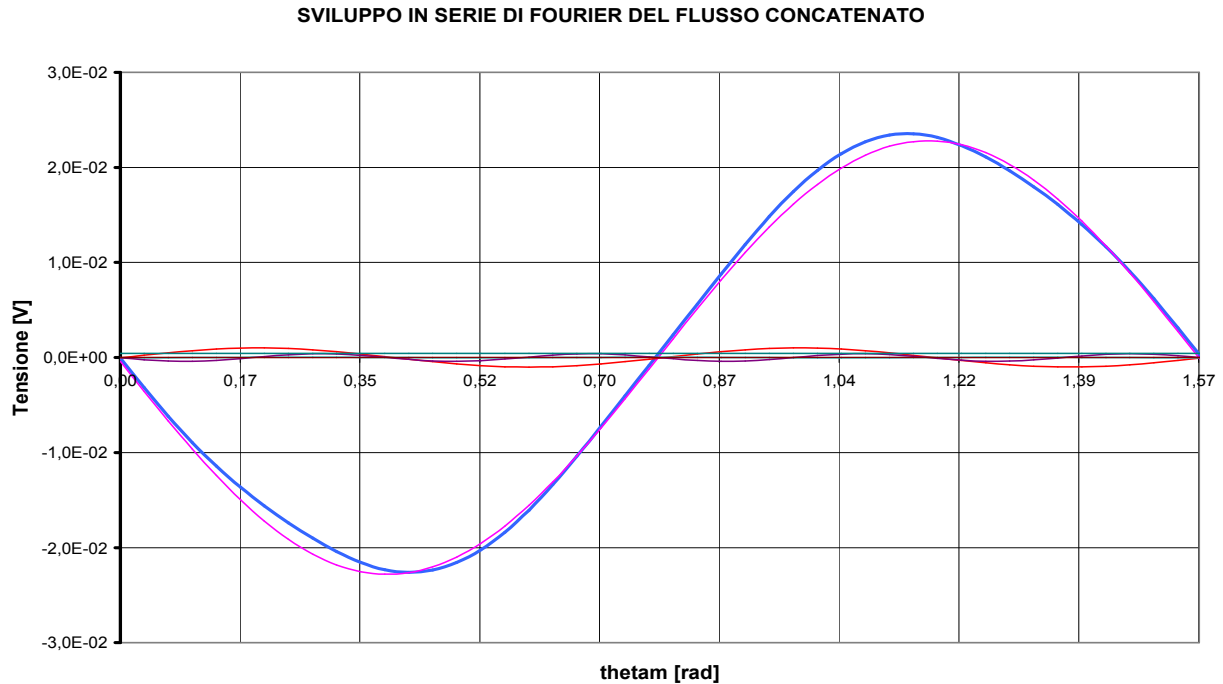


Fig. 2.90: Sviluppo in serie di Fourier del flusso concatenato: modello 3 in regime continuo

Ciascuna delle cinque armoniche nelle quali è stato scomposto il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ è caratterizzata da un'ampiezza e da una fase, le quali sono state determinate automaticamente mediante l'implementazione dello script in codice MATLAB precedentemente descritto. I risultati ottenuti sono stati ordinati e raccolti nella sottostante tabella:

Tabella 2.21: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$

ARMONICA	ak [Wb]	bk [Wb]	Veffk [Wb]	Phase [rad]
1	-3,95E-04	-2,28E-02	1,61E-02	-1,554
2	-3,19E-05	1,00E-03	7,00E-04	1,537
3	-3,80E-05	0	2,69E-05	0,312
4	-3,00E-05	-4,00E-04	3,00E-04	-1,494
5	-8,20E-06	0	5,80E-06	-1,389

Si riportano inoltre i valori dei tre parametri fondamentali che forniscono il grado di distorsione armonica della forma d'onda del flusso concatenato, ovvero il valore efficace **F**, il fattore di distorsione **Fdis** ed il total harmonic distortion **THD**.

$$F = 1.61 \cdot 10^{-2} \text{ [Wb]}$$

$$F_{dis} = 8.46 \cdot 10^{-4} \text{ [Wb]}$$

$$THD = 5.25 \%$$

Una volta determinati i parametri a_1 e b_1 caratteristici della prima armonica del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ è immediato ricostruire il grafico della tensione generata dal modello di microturbina progettato, il quale risulterà descritto dalla nota funzione:

$$e(\theta_m) = \omega_m \cdot 2p \cdot a_1 \sin(2p\theta_m) - \omega_m \cdot 2p \cdot b_1 \cos(2p\theta_m)$$

La forma d'onda della forza elettromotrice in funzione dell'angolo meccanico θ_m così stimata viene riportata nella sottostante figura:

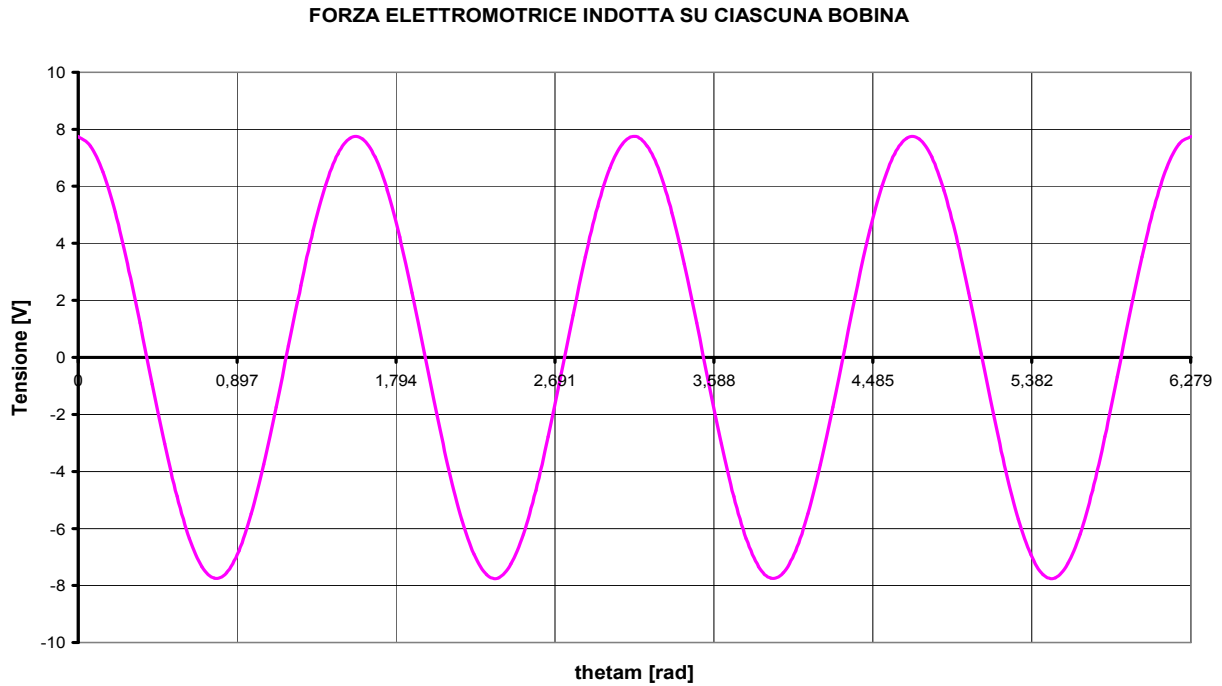


Fig. 2.91: Forza elettromotrice generata a carico in regime continuo (modello 3)

2.3.5 Considerazioni sul modello progettato

Una volta eseguita l'analisi a vuoto, a carico in regime sinusoidale ed in regime continuo del modello progettato è doveroso esaminare con senso critico i risultati ottenuti, in modo da stabilire se il modello di microturbina realizzato presenta caratteristiche molto prossime a quelle prestabilite, al fine di procedere alla sua effettiva costruzione.

Valutazione del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$

Osservando la Fig.2.68 nella quale viene riportato il grafico del flusso concatenato in funzione dell'angolo meccanico θ_m si nota una forma d'onda molto prossima al grafico di una funzione sinusoidale, il che fa supporre la presenza di un contenuto armonico molto ridotto.

Anche in Fig.2.78 ed in Fig.2.86 dove viene riportato il grafico di $\Phi_c(\theta_m)$ nel funzionamento a carico si nota la presenza di una forma d'onda molto prossima alla sinusoidale. Per quanto riguarda il valore massimo del flusso sono stati riscontrati i seguenti valori:

$$\Lambda_c = 2.36 \cdot 10^{-2} \quad [Wb] \quad (Vuoto)$$

$$\Lambda_c = 2.40 \cdot 10^{-2} \quad [Wb] \quad (Regime \quad sinusoidale)$$

$$\Lambda_c = 2.34 \cdot 10^{-2} \quad [Wb] \quad (Regime \quad continuo)$$

I valori sopra citati risultano ben più alti dei corrispondenti valori di flusso concatenato ottenuto dai precedenti modelli, questo è un aspetto positivo poichè maggiore è l'ampiezza del flusso concatenato maggiore risulta il valore efficace della tensione generata.

Osservando inoltre lo sviluppo in serie di Fourier del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ riportato in Fig.2.72 si nota come la forma d'onda della prima armonica sia quasi sovrapponibile a quella del flusso e questo vale anche nel funzionamento a carico.

Infine il **Total Harmonic Distortion** risulta in tutti e tre i regimi di funzionamento circa pari al 5%, valore molto minore rispetto ai precedenti modelli.

Valutazione della coppia sul rotore

La coppia agente sul rotore è un parametro di fondamentale importanza per quanto riguarda lo studio del comportamento elettromagnetico di questo tipo di generatore, pertanto è opportuno valutare attentamente i risultati ottenuti per tutti e tre i regimi di funzionamento:

Funzionamento a vuoto

Il grafico della coppia in funzione dell'angolo meccanico θ_m presenta molteplici oscillazioni, ed è caratterizzata da un valore medio pari a:

$$T_m = 0.5 \quad [mNm]$$

La massima oscillazione di coppia, ovvero la differenza tra il valore massimo ed il valore minimo, è risultata pari al seguente valore:

$$\Delta T = 31.2 \quad [mNm]$$

Rispetto ai modelli precedenti funzionanti a vuoto il valore massimo di coppia risulta minore (circa la metà), inoltre risulta notevolmente minore anche la massima oscillazione di coppia (poco meno della metà).

Questo è un aspetto certamente positivo, poichè aver ottenuto un basso valore del parametro ΔT fa sì che quest'ultimo modello di microturbina sia meno soggetto ad impuntamento rispetto ai suoi predecessori.

Funzionamento in regime sinusoidale

Osservando l'andamento del grafico della coppia agente sul rotore a regime sinusoidale riportato in Fig.2.80 si nota la presenza di un discreto numero di oscillazioni, anche se l'andamento generale del grafico appare piuttosto regolare ed uniforme.

In particolare il valore medio di coppia ottenuto è risultato pari a:

$$T_m = 25 \quad [mNm]$$

Mentre la massima oscillazione di coppia nelle suddette ipotesi di funzionamento è risultata pari al seguente valore:

$$\Delta T = 50.8 \quad [mNm]$$

Anche nel funzionamento a carico in regime sinusoidale il valore di ΔT rimane piuttosto contenuto, questo dimostra che anche in queste condizioni di funzionamento il generatore progettato non è soggetto ad impuntamento elevato.

Funzionamento in regime continuo

Dato che il generatore progettato è stato pensato per funzionare in abbinamento ad un raddrizzatore si è ritenuto interessante analizzare la coppia agente sul rotore nel caso in cui gli avvolgimenti di statore siano percorsi da corrente continua.

Il grafico della coppia ottenuto è stato riportato in Fig.2.87, nel quale si può osservare un andamento generale molto simile a quello ottenuto nel funzionamento a vuoto, questo perchè il valore di corrente introdotto è piuttosto basso. Il valore medio di coppia è risultato pari a:

$$T_m = 0.05 \quad [mNm]$$

Per quanto riguarda la massima oscillazione di coppia ottenuta in queste condizioni di carico è risultata pari a:

$$\Delta T = 30.2 \quad [mNm]$$

Valore circa pari alla massima oscillazione di coppia ottenuta a vuoto. I risultati complessivamente ottenuti dalle simulazioni sono certamente soddisfacenti, poichè la variazione della geometria del rotore con l'apporto delle quattro salienze opportunamente sagomate ha praticamente dimezzato il grado di impuntamento della microturbina espresso dal parametro ΔT .

Valutazione dell' energia magnetica

Il grafico dell' energia magnetica complessivamente messa in gioco è stata riportata in Fig.2.70 ipotizzando il funzionamento a vuoto, e nelle figure 2.81 e 2.88 ipotizzando il funzionamento a carico.

La forma d' onda ottenuta è molto simile in tutti e tre i casi e raggiunge il valore massimo per $\theta_m = K \cdot \frac{\pi}{4} [rad]$, ovvero quando l' ampiezza del traferro in corrispondenza dei magneti permanenti è massima.

È interessante osservare che il valore minimo di energia magnetica (circa pari a 0.645 [J]) si ottiene in corrispondenza a $\theta_m = K \cdot \pi [rad]$, ovvero quando l' ampiezza del traferro in corrispondenza ai magneti permanenti è minima.

Valutazione della coenergia magnetica

I grafici rappresentativi della coenergia magnetica riportati in Fig.2.71, in Fig.2.82 ed in Fig.2.89 nelle corrispettive ipotesi di funzionamento presentano andamenti analoghi, ma leggermente diversi dai corrispondenti valori di energia magnetica.

Tale differenza è probabilmente dovuta alla presenza dei magneti permanenti che tendono a saturare il circuito magnetico, spostando il punto di lavoro in zone non lineari.

Anche la forma d' onda della coenergia magnetica raggiunge il valore minimo (circa 0.662 [J]) in corrispondenza a $\theta_m = K \cdot \pi [rad]$, ossia quando si riduce al minimo l' ampiezza del traferro in

prossimità dei magneti permanenti.

Conclusioni

Quest' ultimo modello di microturbina progettato è certamente migliore dei modelli precedenti! Dai risultati delle analisi effettuate mediante il software FEMM appare in modo inequivocabile che la forma d' onda del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ è molto prossima a quella ideale, poichè presenta un bassissimo contenuto armonico.

Inoltre il basso valore della massima oscillazione di coppia ΔT rende questo modello di microturbina meno soggetto ad impuntamento rispetto ai precedenti.

Individuata dunque una configurazione geometrica di generatore in grado di fornire le prestazioni ottimali desiderate si è potuto dunque passare alla costruzione della macchina, con la speranza che una volta costruita si comporti esattamente come il software FEMM aveva previsto!

Capitolo 3

COSTRUZIONE DEL GENERATORE

Una volta stabilita la configurazione geometrica della microturbina si è proceduto alla realizzazione della stessa, naturalmente dopo aver ordinato e ricevuto tutto il materiale necessario alla sua costruzione.

In realtà per motivi di tempo non è stata realizzata la microturbina nel suo complesso, ma solamente la parte costituente il generatore, tralasciando quindi la componente meccanica che messa in rotazione da un fluido in movimento (gas o acqua) avrebbe dovuto conferire la necessaria potenza meccanica al generatore.

Prima di procedere alla descrizione della costruzione del microgeneratore si è ritenuto opportuno fornire una breve descrizione sui materiali utilizzati:

- **Lamierini ferromagnetici**

Sono del tutto analoghi ai comuni lamierini al silicio impiegati nella costruzione del nucleo magnetico dei comuni trasformatori, sono caratterizzati dalle seguenti dimensioni:

Lunghezza = 42 [mm]

Altezza = 19 [mm]

Spessore = 0.35 [mm]

- **Magneti permanenti**

Vengono costruiti con Neodimio e costituiscono la sorgente primaria di flusso magnetico, presentano le seguenti caratteristiche:

Lunghezza = 9 [mm]

Altezza = 4 [mm]

Larghezza = 20 [mm]

Campo coercitivo = 950000 [A/m]

Induzione residua = 1.05 [T]

Curva di magnetizzazione = lineare

- **Filo di rame**

È realizzato con rame elettrolitico ed è del tutto simile al filo di rame smaltato impiegato nella costruzione degli avvolgimenti delle macchine elettriche. Presenta le seguenti caratteristiche:

Diametro = 0.25 [mm]

Resistività = $0.018 \cdot 10^{-6}$ [Ω m]

Corrente nominale = 500 [mA]

Dopo aver elencato e descritto le proprietà dei materiali utilizzati per costruire il generatore a magnete permanente è opportuno fornire una descrizione dettagliata di tutte le operazioni svolte per costruire la parte elettrica della microturbina progettata.

Tutte le operazioni inerenti alla realizzazione pratica della macchina sono state effettuate presso il laboratorio di Azionamenti Elettrici del dipartimento di ingegneria elettrica, e tutti gli attrezzi e gli strumenti necessari sono stati reperiti nello stesso laboratorio.

3.1 COSTRUZIONE DEL CIRCUITO MAGNETICO

Per prima cosa si è proceduto alla costruzione del circuito ferromagnetico di statore, a tal fine sono stati raccolti e predisposti i lamierini necessari per realizzare un nucleo magnetico di larghezza pari a 20 [mm]; per raggiungere il valore prestabilito di profondità è stato necessario affacciare 58 lamierini, e per garantire il serraggio degli stessi sono stati introdotti dei tiranti provvisori costituiti da viti e bulloni.

Una volta predisposte le due parti del nucleo ferromagnetico sono stati introdotti i magneti permanenti, ponendo particolare attenzione al rispetto delle corrette polarità. Nella sottostante Fig.3.1 viene riportata una foto raffigurante i lamierini utilizzati per la costruzione del circuito magnetico:

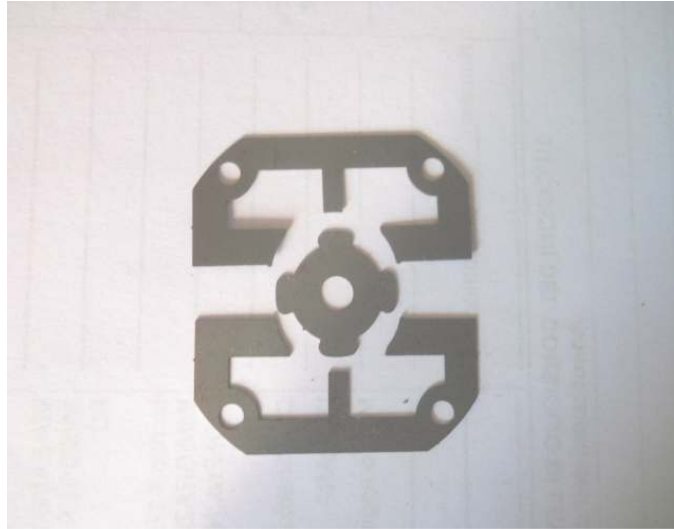


Fig. 3.1: Lamierini utilizzati per la costruzione del circuito magnetico

La costruzione del rotore si è rivelata invece più difficoltosa in quanto, essendo le quattro salienze sagomate in modo diverso al fine di garantire un flusso concatenato di forma sinusoidale, è stato necessario porre particolare attenzione alla sovrapposizione dei lamierini.

Nella sottostante Fig.3.2 viene riportata una fotografia raffigurante il circuito magnetico di statore, una volta serrati i lamierini ed introdotti i magneti permanenti:

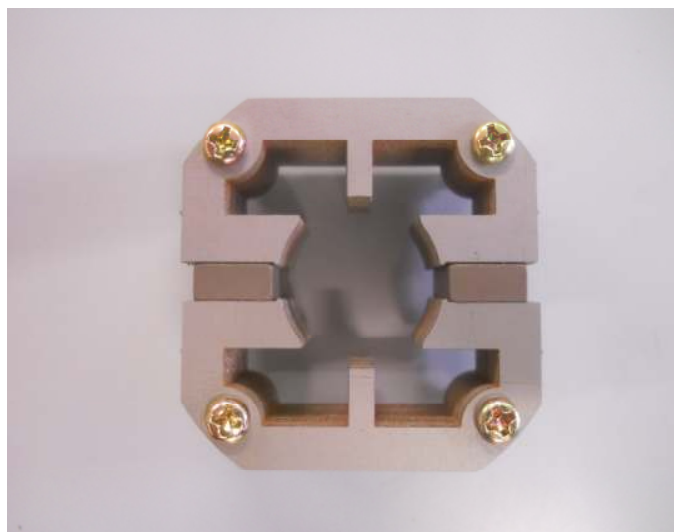


Fig. 3.2: Nucleo magnetico del generatore a magnete permanente

3.2 COSTRUZIONE DEGLI AVVOLGIMENTI

La realizzazione pratica degli avvolgimenti di statore si è rivelata assai complicata per diversi motivi. Innanzitutto si è dovuto costruire un adeguato supporto sul quale avvolgere il filo di rame; inizialmente si era pensato ad un rudimentale rocchetto di legno o di plastica, ma l'impossibilità di realizzarne uno con le dimensioni desiderate ci ha fatto cambiare idea preferendone uno in alluminio.

Scelto il materiale più idoneo, si è proceduto alla costruzione del supporto segnando una spira rettangolare di dimensioni 15×20 [mm] e limandone la superficie laterale fino a raggiungere uno spessore di circa 6 [mm].

Attorno al supporto in alluminio è stata arrotolata una striscia di carta isolante, in modo da impedire al filo di rame di toccare il circuito ferromagnetico durante l'inserimento degli avvolgimenti, evitando così fastidiosi cortocircuiti.

Per avvolgere il filo di rame sul rocchetto di alluminio realizzato è stata utilizzata l'avvolgitrice presente in laboratorio di Azionamenti Elettrici, la quale viene riportata nella seguente foto:



Fig. 3.3: Avvolgitrice utilizzata per la costruzione degli avvolgimenti

Prima di iniziare ad avvolgere il filo di rame sono stati introdotti quattro spaghi tra il supporto di alluminio e la striscia di carta kraft isolante; in modo tale da legare l'avvolgimento sui quattro angoli per evitare che si sfaldi durante la sua estrazione dall'avvolgitrice.

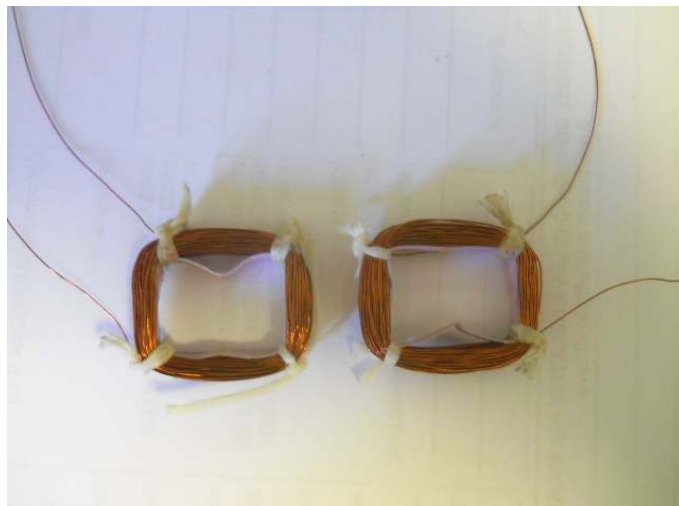


Fig. 3.4: Avvolgimenti di rame appena estratti dall'avvolgitrice

Una volta costruiti gli avvolgimenti si è dovuto affrontare il problema di come inserirli nello statore, dato che lo spazio a disposizione tra i poli nei quali sono inseriti i magneti e i denti introdotti per migliorare la forma d'onda del flusso è davvero limitato.

La limitata distanza disponibile ha condizionato le dimensioni delle bobine, le quali sono state costruite con un numero di spire pari a 200. Prima di introdurre gli avvolgimenti nello statore del generatore si è deciso di avvolgerli con nastro isolante, al fine di evitare il contatto tra il filo di rame ed il nucleo ferromagnetico.

Nonostante sia stato utilizzato filo smaltato il grado di isolamento offerto non dava le necessarie garanzie, poichè si temeva che la rotazione del rotore generasse vibrazioni sufficienti ad asportare lo smalto isolante in corrispondenza degli spigoli più taglienti, causando sgradevoli cortocircuiti. Eseguita la nastratura degli avvolgimenti si è proceduto al loro inserimento nello statore; dopodichè sono stati introdotti spaghi da trasformatore per mantenerli in tiro, allo scopo di evitare anche il minimo contatto con il rotore in rotazione.

Nella sottostante Fig.3.5 viene riportato il generatore in fase di costruzione, al termine dell' inserimento delle bobine.

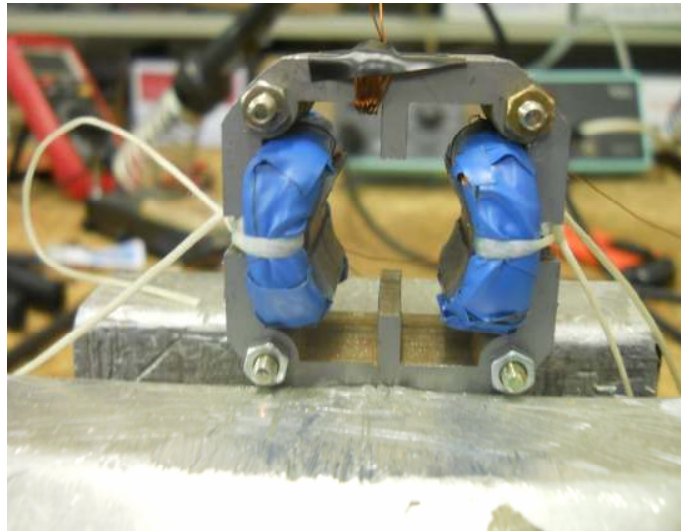


Fig. 3.5: Generatore a magnete permanente con avvolgimenti nastrati

3.3 MONTAGGIO DELLA CARCASSA METALLICA

Una volta costruiti gli avvolgimenti ed inseriti nel circuito magnetico di statore si è proceduto all' inserimento del rotore ed alla montatura della carcassa metallica, effettuata con quattro tiranti costituiti da vite filettata e bullone.

Nella foto seguente si possono osservare tutti i componenti necessari alla realizzazione della carcassa, i quali sono stati forniti su ordinazione insieme ai lamierini ferromagnetici:



Fig. 3.6: Componenti necessari al montaggio della carcassa metallica

Una volta fissati i tiranti sono state introdotte delle guaine isolanti per differenziare i terminali di ingresso e uscita appartenenti allo stesso avvolgimento.

Il generatore a magnete permanente così costruito e pronto per essere messo in funzione viene riportato sottostante Fig.3.7:

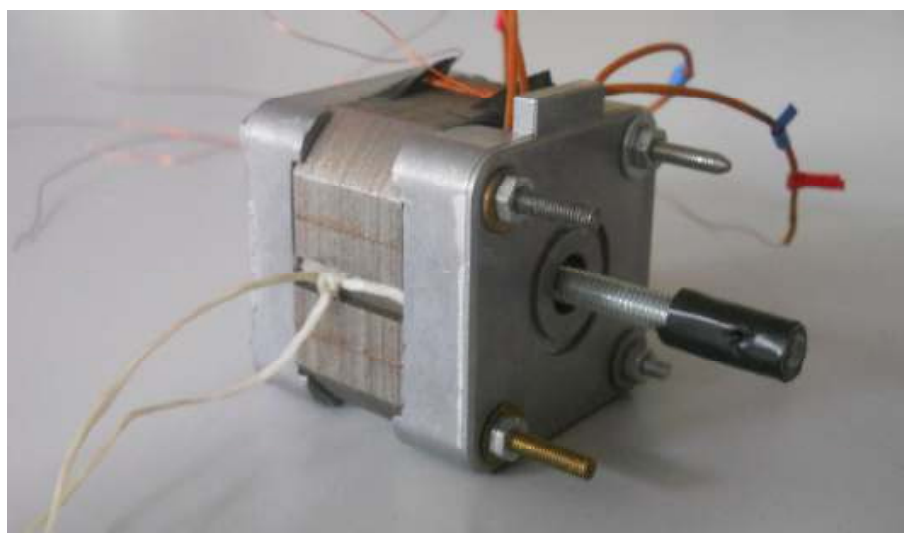


Fig. 3.7: Generatore a magnete permanente per microturbina

Per mancanza di tempo e di idonea strumentazione è stata tralasciata la costruzione della parte di microturbina che a contatto con un fluido in movimento avrebbe dovuto trasmettere l' energia al generatore a magnete permanente; tale energia, come vedremo nel successivo capitolo, sarà fornita da un motore elettrico.

Capitolo 4

COSTRUZIONE DEL RADDRIZZATORE

4.1 PROGETTO DEL MODELLO DI RADDRIZZATORE

L'obiettivo che fin dall'inizio ci si era prefissati era quello di realizzare una microturbina funzionante da batteria, ovvero in grado di alimentare un carico in tensione continua.

Per questo una volta realizzato il generatore a magnete permanente, il passo successivo è stato quello di progettare un convertitore AC/DC capace di raddrizzare la forza elettromotrice generata, riducendone al massimo l'oscillazione d'ampiezza (ripple).

Tra i vari tipi di convertitori esistenti è stato scelto il raddrizzatore monofase a presa centrale poichè presenta una serie di caratteristiche che lo rendono più idoneo degli altri per questo genere di applicazioni. In particolare i pregi offerti sono:

- Semplicità

I componenti elettronici che lo costituiscono sono pochi, semplici e facilmente reperibili, ovvero due diodi ed un condensatore.

- Economicità

Essendo costituito da pochi e semplici componenti, il costo è ridotto al minimo.

- Idoneità

I due avvolgimenti del generatore sono del tutto analoghi al secondario di un trasformatore a presa centrale, essendo perfettamente isolati e magneticamente accoppiati in modo ottimale, rendendo tale raddrizzatore idoneo a questo tipo di applicazione.

Lo schema di principio del raddrizzatore monofase a presa centrale che si intende realizzare al fine convertire la forza elettromotrice generata viene riportato nella sottostante figura:

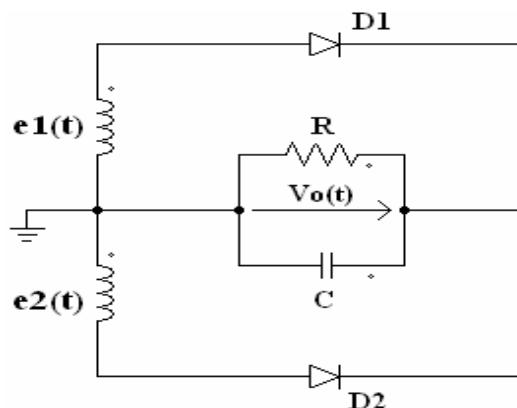


Fig. 4.1: Schema elettronico del convertitore AC/DC

In sede di progetto si è ipotizzato che i due avvolgimenti del generatore a magnete permanente siano equivalenti a due generatori ideali di tensione sinusoidale, caratterizzati dalla stessa ampiezza e stessa frequenza:

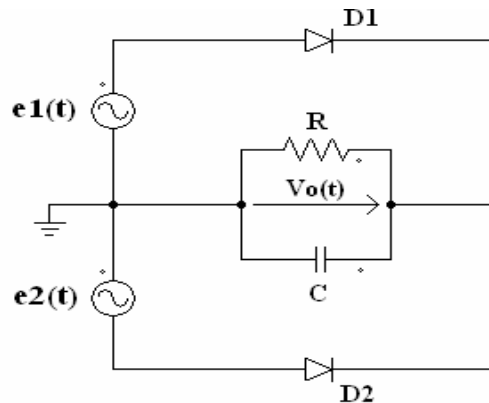


Fig. 4.2: Schema del convertitore AC/DC: avvolgimenti ideali

Le forze elettromotrici dei due generatori sinusoidali ideali saranno descritte da una funzione di questo tipo:

$$E_S(t) = V_{SP} \cdot \sin(\omega_e t) \quad (4.1)$$

Nella quale ω_e rappresenta la pulsazione elettrica e, come si è dimostrato nei precedenti capitoli, è proporzionale alla velocità di rotazione del rotore secondo la relazione $\omega_e = 2p \cdot \omega_m$.

Il principio di funzionamento del convertitore è davvero elementare, poichè quando la tensione generata $e_S(t)$ è positiva entra in conduzione il diodo D1 mentre quando tale tensione è negativa entra in conduzione il diodo D2.

L'andamento della tensione ai capi del carico si può giustificare da un punto di vista fisico con un semplice ragionamento: in assenza della resistenza di carico R il condensatore si caricherebbe al valore di picco della tensione di alimentazione V_{SP} e manterrebbe sempre questo valore, dato che il diodo ne impedirebbe la scarica.

In presenza di carico resistivo il condensatore può scaricarsi attraverso la sua resistenza; per una scarica molto lenta (e quindi per una tensione continua ben livellata) la costante di tempo RC deve essere elevata rispetto al periodo della forza elettromotrice $E_S(t)$.

Sulla base di queste considerazioni le tensioni in gioco presentano le forme d'onda qui di seguito riportate:

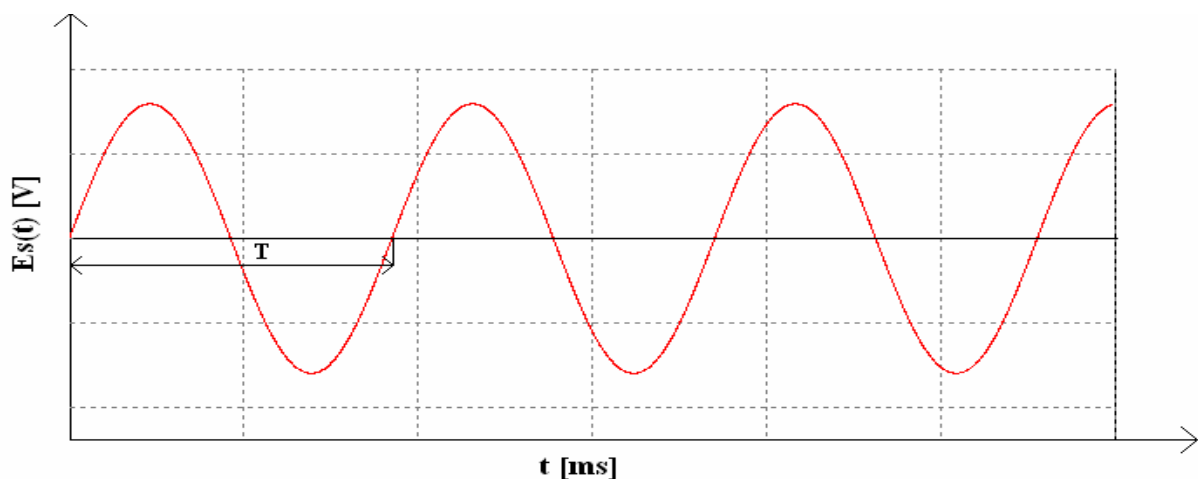


Fig. 4.3: Forma d'onda della tensione generata (ipotizzata)

La tensione d' uscita ai capi del carico sarà caratterizzata dallo stesso valore di picco della tensione generata dalla microturbina, tuttavia presenterà una certa ondulazione residua (ripple) tanto minore quanto più grande sarà la capacità del condensatore.

La frequenza della tensione d' uscita $V_0(t)$ risulterà inoltre doppia rispetto alla frequenza della forza elettromotrice $E_S(t)$ in ingresso al convertitore.

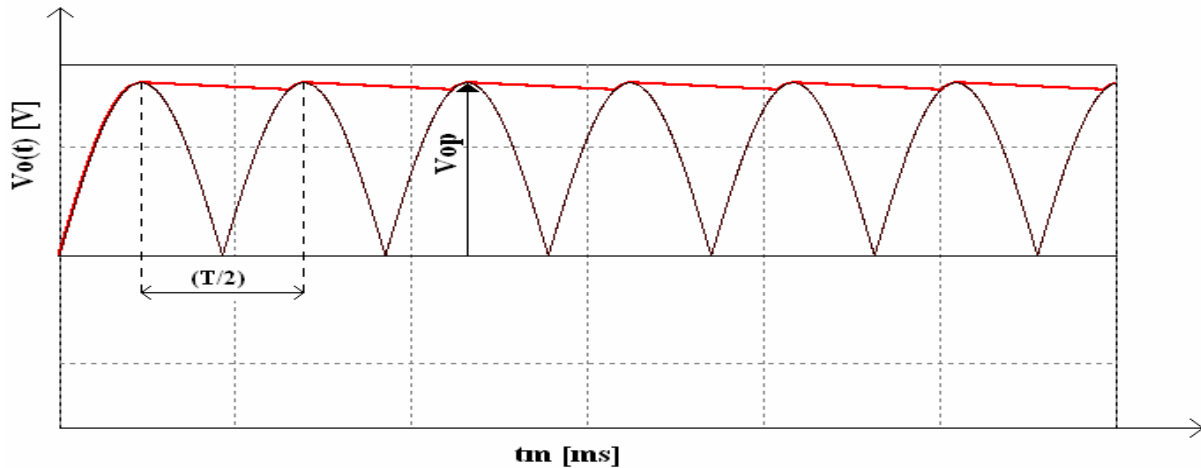


Fig. 4.4: Forma d' onda della tensione in uscita dal raddrizzatore

RIPPLE DELLA TENSIONE D' USCITA:

Al fine di dimensionare il raddrizzatore monofase a presa centrale è indispensabile stimare il ripple della tensione d' uscita, ossia il rapporto tra il valore efficace ed il valore medio della tensione d' uscita $V_0(t)$. Per ottenere una relazione che leghi il fattore di ripple con la capacità del condensatore in parallelo al carico sono state fatte due ipotesi semplificative, ovvero:

- Il tempo di carica del condensatore è molto più piccolo del tempo di scarica e quindi lo si considera nullo.
- Si suppone l' esponenziale di scarica con andamento rettilineo.

Sotto queste ipotesi la forma d' onda della tensione d' uscita appare come nel grafico qui di seguito riportato:

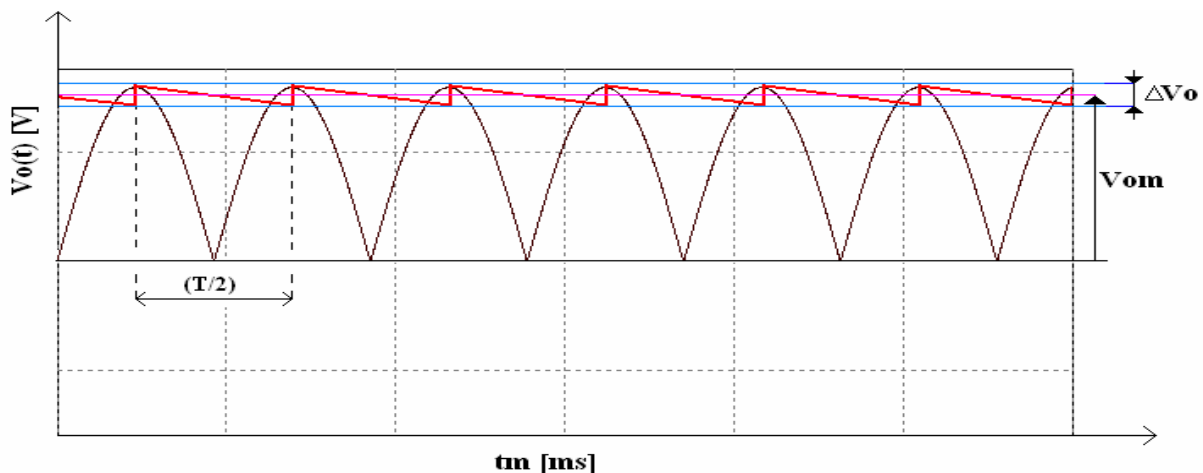


Fig. 4.5: Forma d' onda idealizzata della tensione sul carico

Nel tratto di scarica la tensione sul carico presenta andamento lineare, pertanto può essere descritta dalla seguente funzione:

$$V_0(t) = V_{SP} - \left(\frac{2 \cdot \Delta V_0}{T} \right) t \quad (4.2)$$

La corrente sul condensatore sarà pari a:

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dV_c}{dt}$$

Essendo il carico resistivo connesso in parallelo al condensatore $V_c(t) = V_0(t)$, pertanto la corrente capacitiva $i_c(t)$ risulterà pari a:

$$i_c(t) = C \cdot \frac{dV_0}{dt} = C \cdot \frac{d}{dt} \left[V_{SP} - \left(\frac{2 \cdot \Delta V_0}{T} \right) t \right] = -2 \cdot \frac{C \cdot \Delta V_0}{T} \quad (4.3)$$

La corrente capacitiva risulta pertanto costante durante il tratto di scarica del condensatore; in virtù del principio della conservazione della carica il valore medio della tensione sul condensatore deve essere pari al valore medio della tensione d'uscita, ovvero:

$$V_{0m} = V_{cc}$$

Osservando la Fig.4.5 ci si accorge immediatamente che il valore medio della tensione d'uscita sarà pari a:

$$V_{0m} = V_{SP} - \frac{\Delta V_0}{2} \quad (4.4)$$

Nella quale V_{SP} rappresenta il valore di picco della forza elettromotrice generata, mentre ΔV_0 rappresenta il valore picco picco della tensione d'uscita. Essendo la variazione di tensione sul carico pari alla variazione di tensione sul condensatore, l'ampiezza di ΔV_0 risulterà proporzionale alla carica transitata nel tempo $T/2$, ovvero:

$$\Delta V_0 = \frac{\Delta Q}{C} \quad (4.5)$$

La quantità di carica ΔQ transitata durante il periodo di scarica del condensatore deve essere equivalente all'area racchiusa dalla corrente di carico $i_0(t)$ nel periodo $T/2$, pertanto la si può stimare mediante la seguente relazione:

$$\Delta Q = I_{0m} \cdot \frac{T}{2} \quad (4.6)$$

Nella quale I_{0m} rappresenta il valore medio della corrente d'uscita $i_0(t)$. Sostituendo l'equazione (4.6) nell'espressione (4.5) si ottiene la massima oscillazione della tensione d'uscita in funzione del valore medio della corrente I_{0m} , ovvero:

$$\Delta V_0 = \frac{I_{0m} \cdot T}{2C} \quad (4.7)$$

Introducendo l'equazione (4.7) nell'equazione (4.4) si ottiene l'espressione che esprime il valore medio della tensione d'uscita in funzione del valore medio della corrente sul carico:

$$V_{0m} = V_{SP} - \frac{I_{0m} \cdot T}{4C} \quad (4.8)$$

Tracciando il grafico della funzione $V_{0m} = f(I_{0m})$ si nota come il valore medio della tensione d'uscita diminuisca progressivamente all'aumentare del valore medio della corrente che attraversa la resistenza di carico.

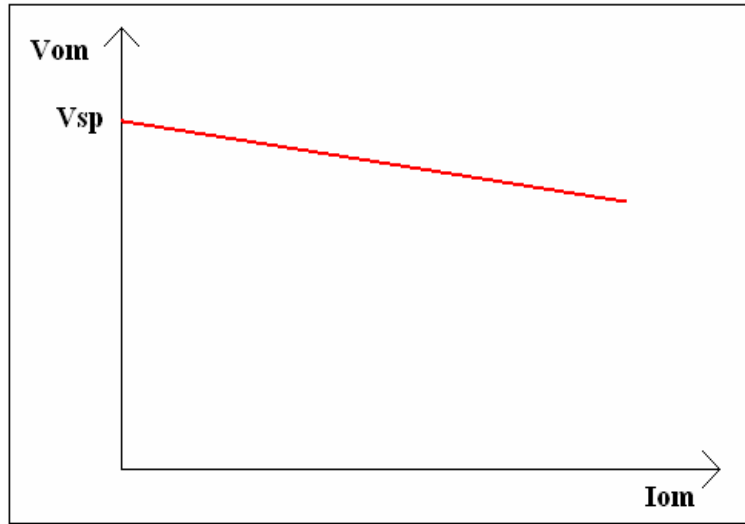


Fig. 4.6: Tensione d' uscita in funzione della corrente di carico

Detto questo si procede alla stima del fattore di ripple eseguendo il rapporto tra il valore efficace dell'ondulazione residua $V_0(t)$ ed il suo valore medio, ovvero:

$$r = \frac{V_{0eff}}{V_{0m}} \quad (4.9)$$

Avendo supposto la tensione d'uscita $V_0(t)$ a dente di sega il corrispondente valore efficace risulta essere pari a:

$$V_{0eff} = \frac{\Delta V_0}{2\sqrt{3}} \quad (4.10)$$

Introducendo la suddetta equazione in quella precedente si ottiene l'espressione del ripple in funzione del valore medio della tensione d'uscita, ovvero:

$$r = \frac{\Delta V_0}{2\sqrt{3} \cdot V_{0m}} \quad (4.11)$$

Infine introducendo nell'espressione del ripple sopra riportata l'equazione (4.7) si ottiene la seguente equazione:

$$r = \frac{I_{0m} \cdot T}{4\sqrt{3} \cdot C \cdot V_{0m}} \quad (4.12)$$

Applicando la legge di Ohm ai valori medi di tensione e corrente sulla resistenza di carico, ovvero $V_{0m} = R \cdot I_{0m}$, e ricordando che il periodo della tensione generata è l'inverso della frequenza si ottiene la seguente espressione finale di ripple:

$$r = \frac{1}{4\sqrt{3} \cdot f \cdot C \cdot R} \quad (4.13)$$

L'equazione (4.13) è di notevole utilità pratica poichè lega il valore del ripple alla capacità del condensatore di livellamento e alla resistenza del carico resistivo, e può essere direttamente utilizzata per il dimensionamento del convertitore.

In particolare l'espressione (4.13) è stata impiegata al fine di stimare la capacità C del condensatore necessaria per ottenere il valore di ripple prestabilito; la procedura di calcolo completa viene riportata nel successivo paragrafo.

DIMENSIONAMENTO DEL CONVERTITORE:

Dimensionare il raddrizzatore significa sostanzialmente determinare il valore della capacità C del condensatore in parallelo al carico, al fine di ottenere il valore di ripple prefissato.

Per prima cosa è necessario conoscere il valore della frequenza della tensione generata dalla microturbina, per questo è necessario stabilire il valore nominale della velocità angolare alla quale si prevede di far funzionare il generatore a magnete permanente e dato che si prevede di fornire l'energia meccanica tramite un motore in continua, la velocità nominale è stata posta pari alla velocità massima di rotazione alla quale il motore è in grado di portarsi, ovvero:

$$\omega_m = 170 \quad [rad/s]$$

La corrispondente pulsazione elettrica caratteristica della forza elettromotrice generata dalla microturbina risulterà pertanto:

$$\omega_e = 2p \cdot \omega_m = 4 \cdot 170 = 680 \quad [rad/s]$$

La frequenza della tensione generata sarà circa pari a:

$$f = \frac{\omega_e}{2\pi} = \frac{680}{2\pi} \approx 108 \quad [Hz]$$

Il valore della resistenza di carico, in virtù delle considerazioni fatte nel precedente capitolo, è stata posta pari a:

$$R = 1000 \quad [\Omega]$$

Per ottenere un buon livellamento della tensione d'uscita si è imposto ad arbitrio un basso valore di ripple, pari allo 0.1%, pertanto si è imposto:

$$r = 0.001$$

A questo punto si dispongono di tutti parametri necessari per stimare la capacità del condensatore di livellamento, applicando l'espressione (4.13) si ottiene pertanto:

$$C = \frac{1}{4\sqrt{3} \cdot f \cdot r \cdot R} = \frac{1}{4\sqrt{3} \cdot 108 \cdot 0.001 \cdot 1000} = 1336 \quad [\mu F]$$

Una volta determinato il valore teorico di capacità, si è deciso di realizzare il convertitore AC/DC con uno dei tanti condensatori reperibili in laboratorio di Azionamenti. Tra i vari condensatori è stato scelto quello caratterizzato da una capacità nominale molto prossima alla capacità teorica stimata, e quindi pari a:

$$C_N = 1000 \quad [\mu F]$$

Pur essendo tale valore inferiore di circa il 30% rispetto alla capacità teorica stimata, risulta comunque sufficiente a garantire un buon livellamento della tensione generata dalla microturbina.

SCELTA DEI DIODI:

Per quanto riguarda la scelta dei diodi da utilizzare per costruire il convertitore ci si deve accertare che il valore massimo della corrente che li attraversa durante la fase di conduzione sia sopportabile, pertanto è doveroso stimarne (anche se in modo approssimato) il valore di picco. Al fine di motivare l'andamento nel tempo della corrente circolante si deve tenere presente che il condensatore accumula cariche durante il tempo di conduzione dei diodi e ne cede la medesima quantità durante il transitorio di scarica; sulla base di queste considerazioni si ipotizza che le correnti in gioco presentino una forma d'onda molto simile a quella riportata nella sottostante figura:

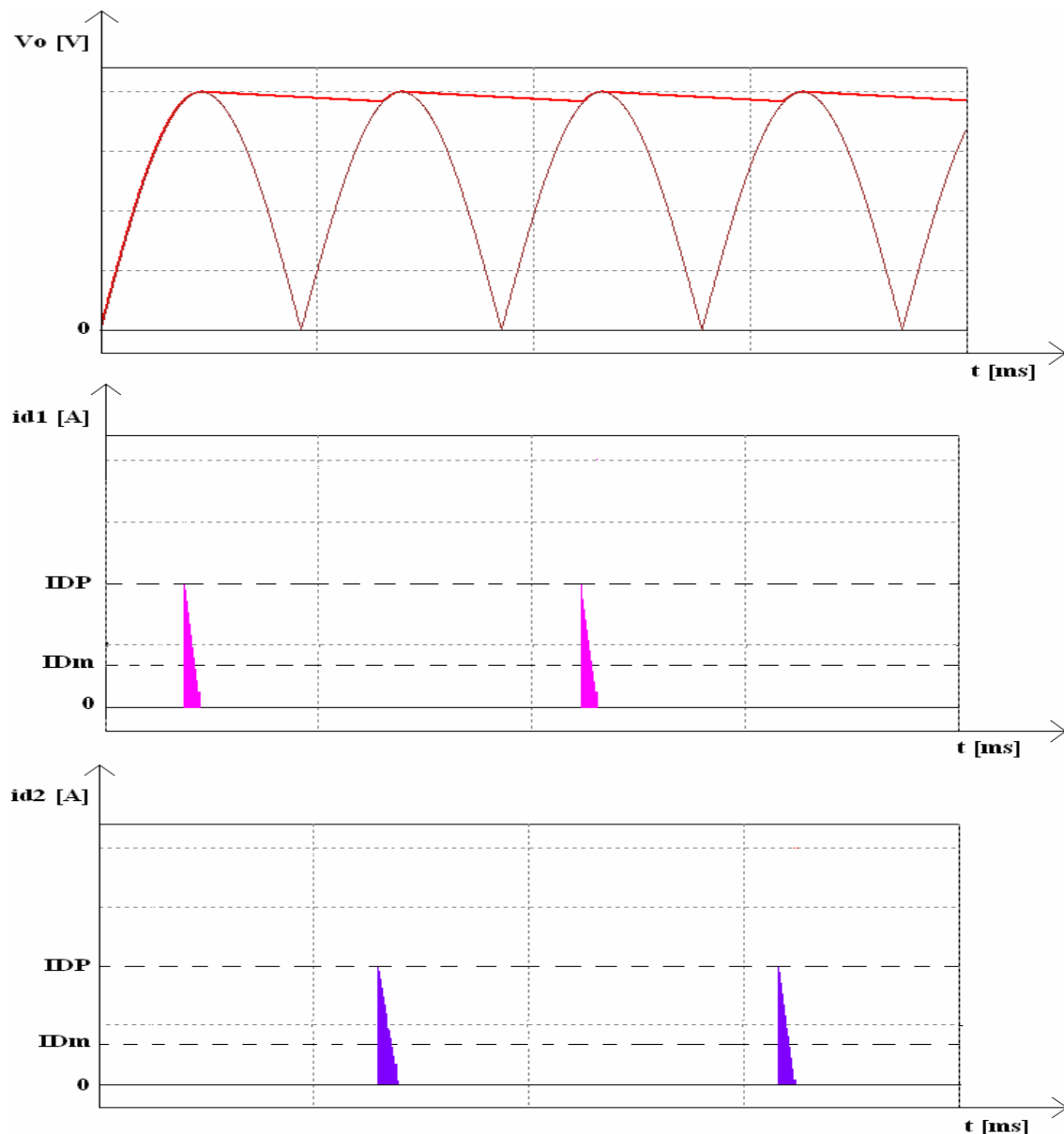


Fig. 4.7: Tensione sul carico e correnti circolanti nei diodi

È quindi ragionevole ipotizzare che le correnti $i_{d1}(t)$ e $i_{d2}(t)$ circolanti nei diodi durante la fase di conduzione siano di natura impulsiva; al diminuire dell'ondulazione residua l'intervallo di conduzione è sempre più piccolo e quindi a parità di altre condizioni aumenta l'ampiezza dei picchi perchè la stessa quantità di carica deve essere accumulata in un tempo più breve. Nella precedente figura (4.7) si è ritenuta trascurabile la corrente circolante nei diodi durante il transitorio di scarica del condensatore, in realtà per il principio di conservazione della carica, tale valore è diverso da zero, pur risultando molto piccolo.

Il fatto che la carica accumulata durante la conduzione dei diodi coincida con quella ceduta al carico durante il transitorio di scarica permette di scrivere:

$$I_{Dm} \cdot T = I_{0m} \cdot \frac{T}{2} \quad (4.14)$$

Nella quale I_{Dm} rappresenta il valore medio della corrente nel diodo. Dalla precedente equazione si ricava che I_{Dm} risulta pari alla metà del valore medio della corrente di carico, ovvero:

$$I_{Dm} = \frac{I_{0m}}{2} \quad (4.15)$$

Per una corretta scelta dei diodi si deve tuttavia tenere presente che il valore di picco della corrente risulta ben più elevato del valore medio I_{Dm} . Al fine della stima del valore di picco I_{DP} è stata utilizzata la seguente formula empirica, di cui per semplicità non ne viene riportata la dimostrazione:

$$I_{DP} = 2\pi \cdot I_{Dm} \cdot \sqrt{f \cdot C \cdot R} \quad (4.16)$$

In ogni caso i diodi sono stati scelti in modo da essere in grado di sopportare un valore massimo di corrente pari a I_{DP} maggiorato del suo 30%. Stimando un valore medio di tensione sul carico pari all' ampiezza massima della forza elettromotrice raddrizzata, ovvero:

$$V_{0m} = 8 \text{ [V]}$$

Il valore medio della corrente sul carico stimato sarà circa pari a:

$$I_{0m} = \frac{V_{0m}}{R} = \frac{8}{1000} = 0.008 \text{ [A]}$$

La quale permette di stimare il valore medio della corrente nei diodi:

$$I_{Dm} = \frac{I_{0m}}{2} = 0.004 \text{ [A]}$$

Pertanto applicando l' espressione (4.16) la massima corrente di picco che i diodi dovranno essere in grado di sopportare risulterà circa pari a:

$$I_{DP} = 2\pi \cdot 0.004 \cdot \sqrt{108 \cdot 1000 \cdot 10^{-6} \cdot 1000} = 0.261 \text{ [A]}$$

Sulla base di queste considerazioni è stata effettuata la scelta dei diodi idonei per questo tipo di applicazione.

4.2 ANALISI DEL CONVERTITORE CON POWER-SIM

Eseguito il dimensionamento del convertitore AC/DC applicando le equazioni analitiche ottenute dall'analisi teorica esposta nei precedenti paragrafi, si è proceduto all'analisi del comportamento del raddrizzatore progettato mediante il programma di simulazione **Power-Sim**, il quale come logica di analisi è molto simile al programma di simulazione **P-Spice**.

Al fine di ottenere dei risultati il più possibile precisi, gli avvolgimenti della microturbina sede di forze elettromotrici indotte sono stati rappresentati mediante dei generatori reali di tensione, tenendo conto della loro resistenza R e della loro reattanza induttiva X .

Misura della resistenza

Per determinare il valore della resistenza degli avvolgimenti di statore della microturbina in modo veloce e preciso è stata eseguita una misurazione della stessa mediante multimetro digitale, il quale per entrambi gli avvolgimenti ha fornito il seguente risultato:

$$R = 6.3 \quad [\Omega]$$

Tale valore di resistenza è stato ottenuto con una temperatura ambiente di circa $26 [^{\circ}\text{C}]$, il valore di resistenza convenzionale riportato a $40 [^{\circ}\text{C}]$ risulterà pertanto:

$$R_i = R_T \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta T) = 6.3 \cdot (1 + 0.004 \cdot 14) = 6.65 \quad [\Omega]$$

Misura della reattanza induttiva

Al fine di effettuare la misurazione dell'induttanza degli avvolgimenti di statore si è deciso di seguire una procedura caratterizzata dai seguenti passi:

1) MISURA DELLA TENSIONE A VUOTO A FREQUENZA RIDOTTA

Mediante un motore DC a magnete permanente avente tensione nominale pari a $12 [\text{V}]$ è stato portato in rotazione il rotore della microturbina realizzata, fino a raggiungere una velocità di rotazione pari a:

$$\omega_m = 51 [\text{rad/s}]$$

Dopodichè mediante oscilloscopio digitale è stata visualizzata la forma d'onda della forza elettromotrice generata dalla microturbina, lo schema di principio seguito al fine di effettuare la misura della tensione a vuoto viene riportato nella sottostante figura:

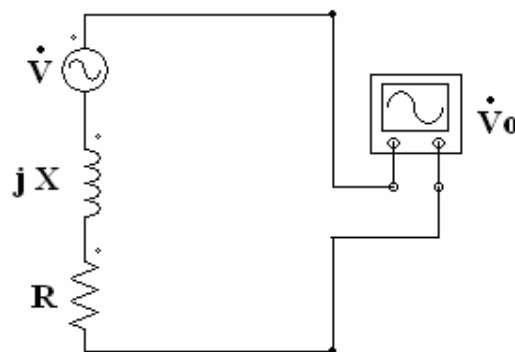


Fig. 4.8: Misura della tensione a vuoto
a frequenza ridotta

La forma d'onda della tensione indotta negli avvolgimenti di statore visualizzata tramite oscilloscopio digitale è stata successivamente rielaborata mediante l'ausilio del foglio elettronico EXCEL, ed il suo grafico in funzione del tempo viene riportato in Fig.4.9 della pagina successiva.

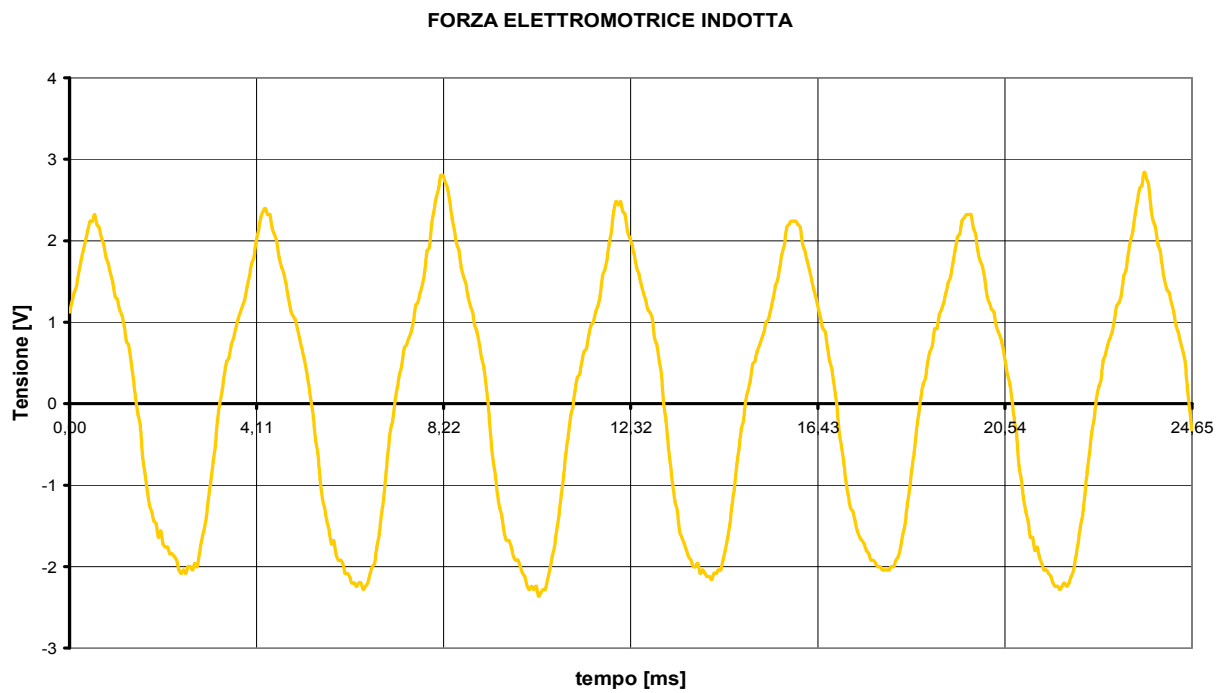


Fig. 4.9: Forma d' onda della tensione a vuoto a frequenza ridotta

Come si può osservare la forma d' onda della tensione generata è piuttosto simile al grafico di una sinusoide, e questo è un aspetto certamente positivo. Per determinarne il valore efficace si è eseguita la scomposizione in serie di Fourier e l' armonica fondamentale così ottenuta viene riportata nella sottostante figura:

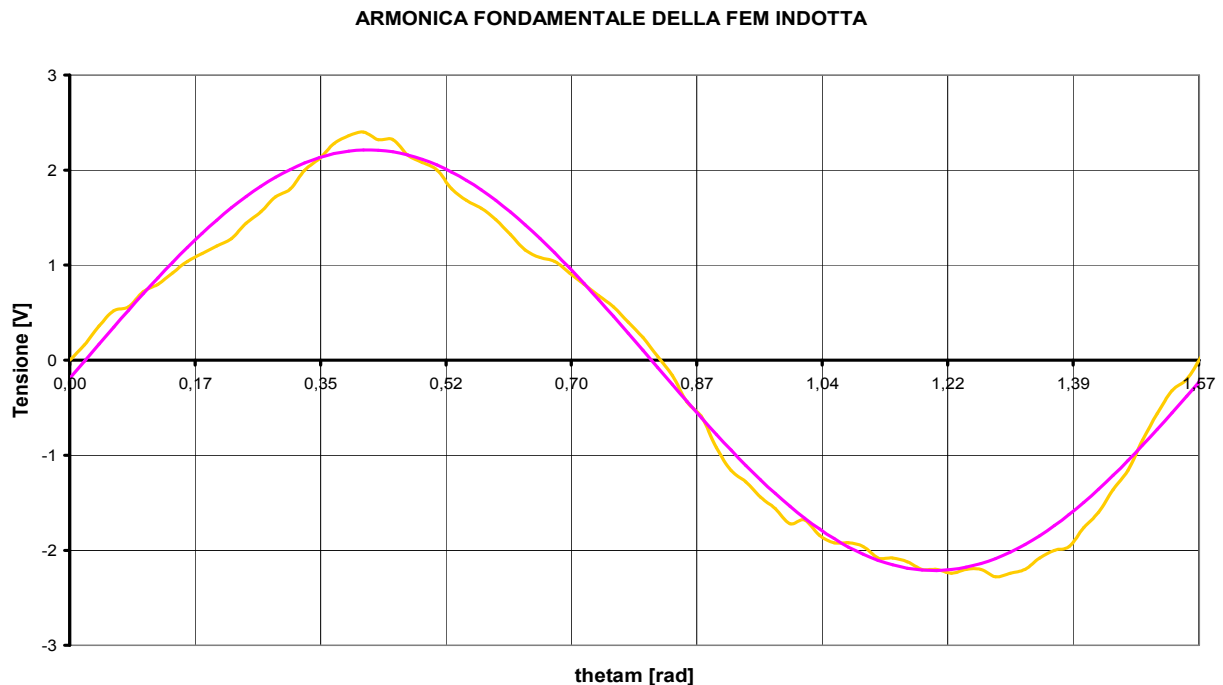


Fig. 4.10: Forma d' onda della tensione a vuoto a frequenza ridotta

Il valore massimo dell' armonica fondamentale della forza elettromotrice indotta ricavato dal grafico in Fig.4.10 risulta essere pari al seguente valore:

$$V_{0M} = 2.212 \quad [V]$$

E quindi il corrispondente valore efficace sarà pari a:

$$V_{0eff} = \frac{V_{0M}}{\sqrt{2}} = 1.564 \quad [V]$$

Una volta stimato il valore efficace della tensione a vuoto si è proceduto alla misura della corrente di cortocircuito che attraversa l'avvolgimento di statore a frequenza ridotta.

2) MISURA DELLA CORRENTE DI CORTOCIRCUITO A FREQUENZA RIDOTTA

Al fine di effettuare la misura della corrente di cortocircuito a frequenza ridotta si è portato in rotazione il rotore della microturbina (sempre tramite il motore DC precedentemente menzionato) sino alla velocità prefissata, ovvero $\omega_m = 51 \text{ [rad/s]}$.

Dopodichè sempre mediante multimetro elettronico impostato in modalità amperometro è stato misurato il valore efficace della corrente circolante negli avvolgimenti di statore; lo schema di principio della misura effettuata viene riportato nella sottostante figura:

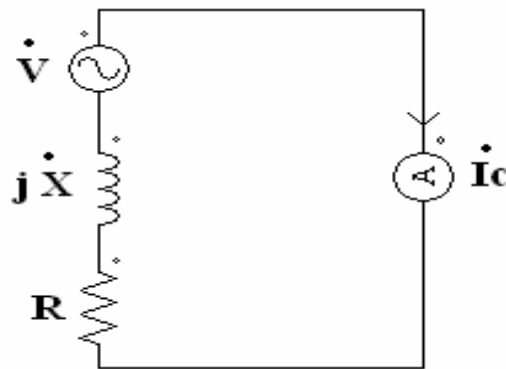


Fig. 4.11: Misura della corrente di corto a frequenza ridotta

Il valore efficace della corrente circolante negli avvolgimenti è risultato pari a:

$$I_c = 0.172 \quad [A]$$

3) CALCOLO DELLA REATTANZA INDUTTIVA

Dopo aver stimato i valori efficaci della tensione a vuoto e corrente di cortocircuito a frequenza ridotta è immediato determinare il modulo dell'impedenza equivalente serie del circuito rappresentativo dell'avvolgimento di statore mediante la seguente espressione:

$$Z = \frac{V_{0eff}}{I_c} = \frac{1.564}{0.172} = 9.093 \quad [\Omega]$$

La reattanza induttiva caratteristica dell'avvolgimento di statore si può calcolare applicando il teorema di Pitagora associato al triangolo delle impedenze, ovvero:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{9.093^2 - 6.3^2} = 6.557 \quad [\Omega]$$

Mentre l'induttanza ad essa associata si determina con la nota relazione:

$$L = \frac{X}{2p \cdot \omega_m} = \frac{6.557}{4 \cdot 51} = 32.14 \quad [mH]$$

In realtà non sarebbe corretto definire il valore di L così stimato l'autoinduttanza dell'avvolgimento di statore, poichè i magneti permanenti costituiscono la sorgente principale di campo di induzione magnetica, mentre il contributo al campo B fornito dalla corrente circolante negli avvolgimenti è praticamente trascurabile.

In virtù di queste considerazioni sarebbe più corretto definire L semplicemente come un **coefficiente induttivo** associato alla reattanza X.

Dopo aver stimato tutti i parametri caratteristici degli avvolgimenti del generatore a magnete permanente costruito e del raddrizzatore progettato si è proceduto all'analisi del comportamento del convertitore AC/DC mediante il software di simulazione Power-Simulation; nella seguente figura viene riportato il circuito realizzato e i valori dei parametri introdotti al fine di eseguire una corretta e precisa simulazione.

Gli avvolgimenti del generatore a magnete permanente realizzato vengono rappresentati mediante due generatori reali di tensione:

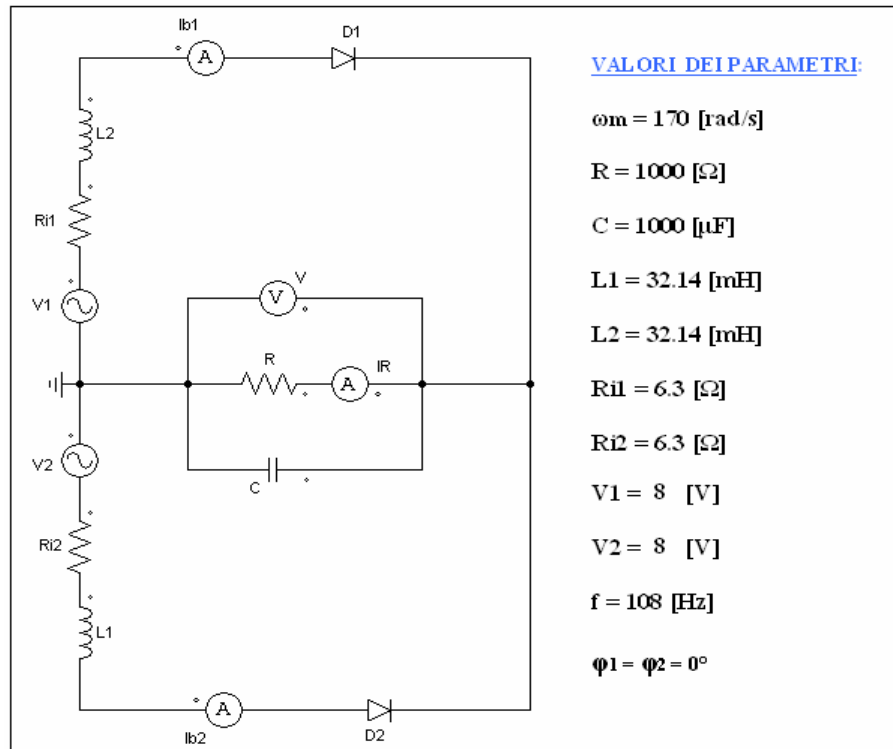


Fig. 4.12: Analisi del raddrizzatore mediante Power-Simulation

Tensione sul carico

Il grafico di maggior interesse è certamente quello rappresentativo dell'andamento della tensione in uscita dal raddrizzatore e applicata al carico resistivo, il quale viene riportato nella sottostante Fig.4.13:

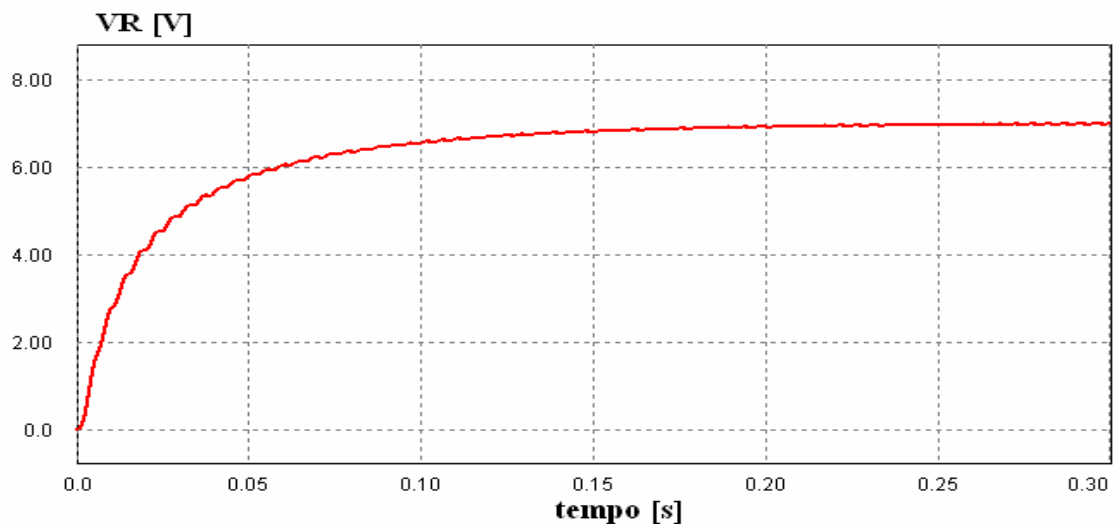


Fig. 4.13: Tensione ai capi del carico resistivo ottenuta con Power-Simulation

La forma d' onda ottenuta è del tutto simile alla curva di carica del condensatore, in effetti all' istante iniziale $t = 0$ lo si può ritenere del tutto equivalente ad un cortocircuito e la tensione ai suoi capi è nulla.

Al crescere della corrente il condensatore si carica e di fatto si comporta come una forza contro elettromotrice, la quale smette di aumentare nel momento in cui eguaglia il valore massimo della forza elettromotrice generata dalla microturbina.

Essendo il valore di capacità piuttosto elevato ($1000 [\mu F]$) il ripple della tensione d' uscita è praticamente trascurabile, pertanto la si può ritenere costante una volta terminato il transitorio di carica del condensatore.

Corrente sul carico

Essendo il carico puramente resistivo la forma d' onda della corrente che lo attraversa presenterà certamente lo stesso andamento della tensione, essendo per la legge di Ohm $V_0 = R \cdot I_R$.

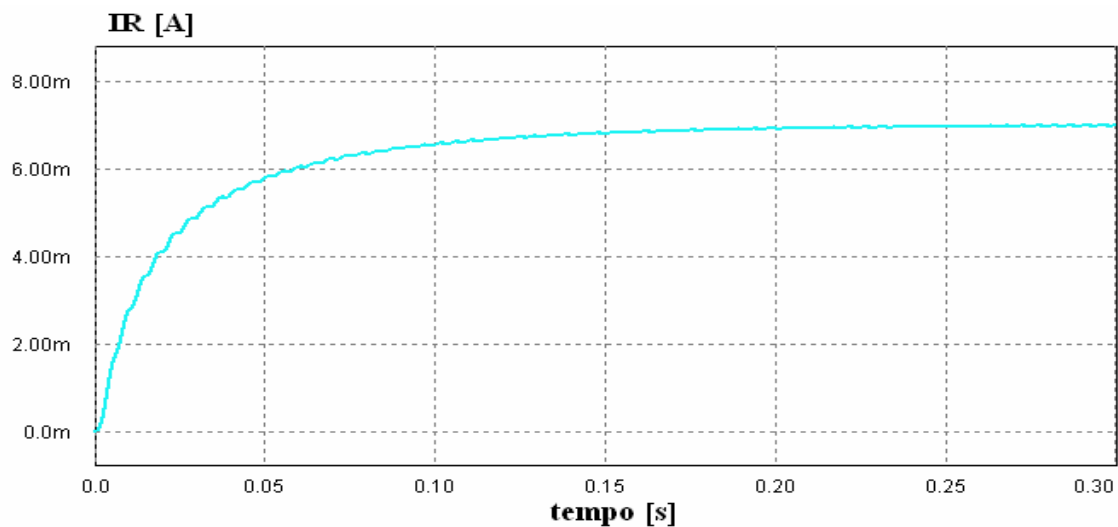


Fig. 4.14: Corrente circolante sul carico resistivo ottenuta con Power-Simulation

Corrente nel primo avvolgimento

Si riporta nella sottostante figura l' andamento in funzione del tempo della corrente $I_{b1}(t)$ circolante nel diodo D1 ottenuta mediante simulazione con il software Power-Sim:

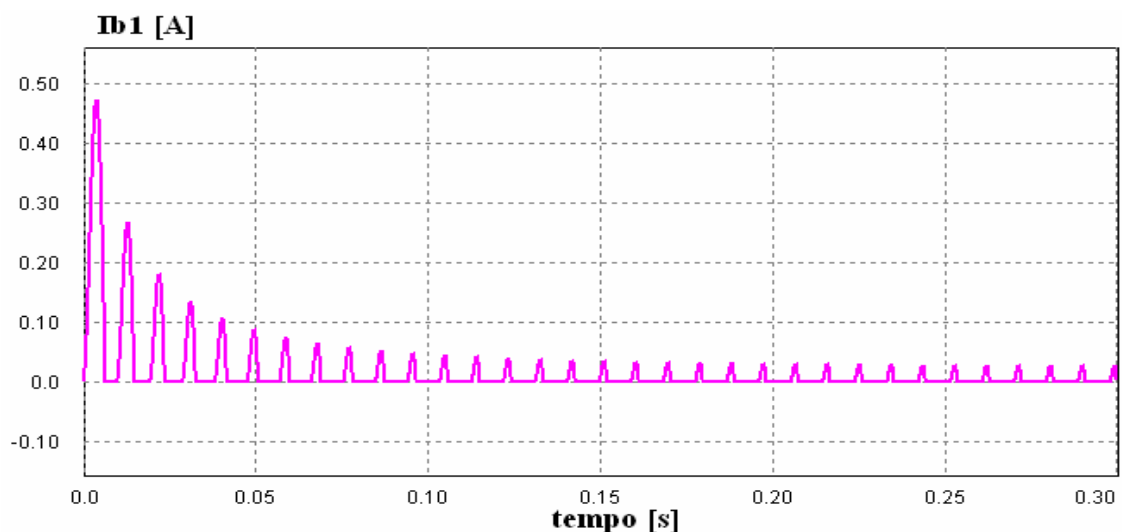


Fig. 4.15: Corrente circolante nel primo avvolgimento ottenuta con Power-Simulation

Nel tratto iniziale del grafico della funzione $I_{b1}(t)$ si possono riscontrare dei picchi di corrente piuttosto elevati, questo è dovuto al fatto che il condensatore in derivazione al carico essendo inizialmente scarico è equivalente ad un cortocircuito, pertanto la tensione impressa dal generatore a magnete permanente non viene contrastata da nessuna forza contro elettromotrice.

Man mano che il condensatore si carica aumenta la tensione ai suoi capi e conseguentemente l'ampiezza dei picchi di corrente si riduce progressivamente fino a stabilizzarsi.

L'andamento a picchi della corrente è generato dai continui travasi di carica ai quali è soggetto il condensatore, la tensione d'uscita $V_0(t)$ presenta sempre una certa ondulazione e durante la fase di carica cresce con andamento esponenziale.

Quando il diodo D1 è in fase di conduzione la corrente che lo attraversa coincide con la corrente circolante nel condensatore, la quale sarà pertanto legata alla tensione d'uscita dalla legge:

$$i_{B1}(t) = i_c(t) = C \cdot \frac{dV_c}{dt}$$

Essendo la derivata di una funzione esponenziale crescente una retta, questo spiega l'andamento a dente di sega della corrente negli avvolgimenti durante il transitorio di carica.

Corrente nel secondo avvolgimento

Nella sottostante figura viene riportato il grafico della corrente in funzione del tempo nel secondo avvolgimento di statore la cui forma d'onda, com'era logico prevedere, è del tutto simile a quella della corrente $I_{B1}(t)$ appena descritta:

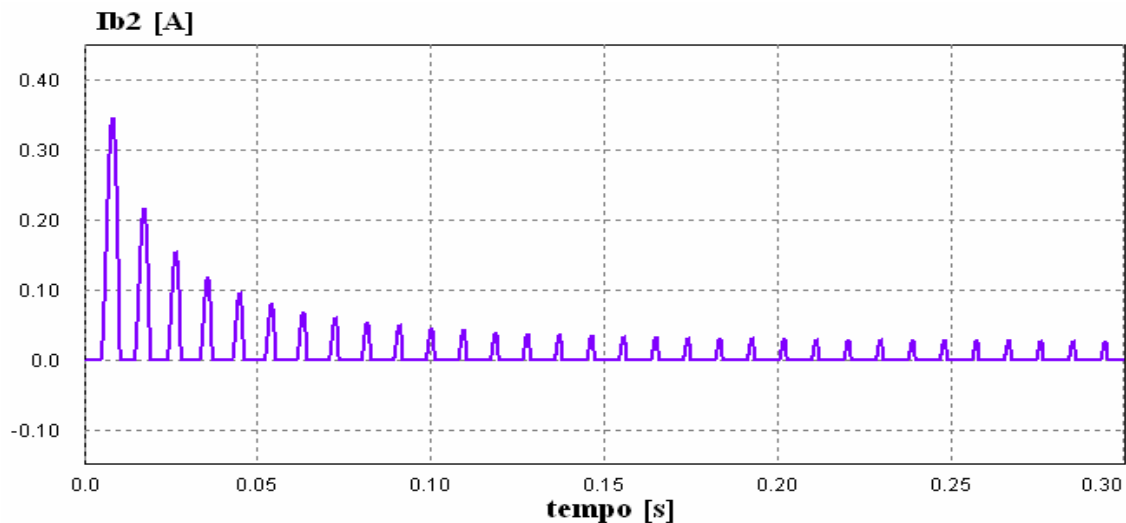


Fig. 4.16: Corrente circolante nel secondo avvolgimento ottenuta con Power-Simulation

I risultati forniti dalle simulazioni, sia in termini di valori che in termini di andamenti grafici, sono la prova che il convertitore AC/DC si comporta esattamente come era stato previsto in sede di progetto, e pertanto sono stati ritenuti soddisfacenti.

Al termine del progetto e dell'analisi del raddrizzatore monofase a presa centrale si è proceduto alla sua effettiva costruzione.

4.3 COSTRUZIONE DEL CONVERTITORE

La costruzione del raddrizzatore progettato si è rivelata davvero molto semplice e veloce, poichè è stato sufficiente connettere nel modo opportuno due diodi, un resistore da 1000 $[\Omega]$ ed un condensatore da 1000 $[\mu F]$; ovviamente tutti i componenti sono stati reperiti nel laboratorio di Azionamenti Elettrici.

Come supporto di base è stata utilizzata una basetta **Breadboard**, la quale facilita notevolmente la realizzazione delle connessioni tra i vari componenti elettronici; il raddrizzatore così costruito viene riportato nella sottostante figura:

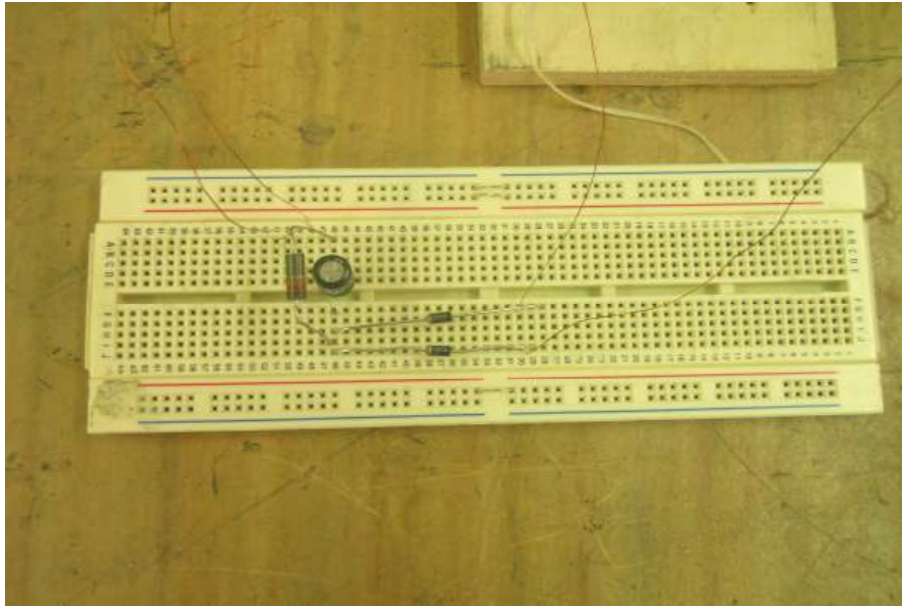


Fig. 4.17: Convertitore AC/DC monofase a presa centrale realizzato su basetta Breadboard

Prima di procedere al capitolo successivo nel quale vengono descritte tutte le misure effettuate sul generatore a magnete permanente realizzato, si è ritenuto opportuno elencare i valori nominali dei componenti elettronici utilizzati per costruire il convertitore AC/DC monofase a presa centrale:

Resistore di carico

- Valore nominale di resistenza: 1000 $[\Omega]$

Condensatore di livellamento

- Valore nominale di capacità: 1000 $[\mu F]$
- Tensione nominale: 50 [V]
- Temperatura massima: 105 $^{\circ}C$
- Tipo di appartenenza: Condensatore elettrolitico

Diodi

- Tensione di rottura: 1000 [V]
- Tensione massima RMS: 700 [V]
- Corrente massima: 1 [A]
- Massima corrente inversa: 5 $[\mu A]$
- Temperatura massima: 75 $^{\circ}C$
- Sigla identificativa: 1N4007 DC

Capitolo 5

MISURE ESEGUITE SUL PROTOTIPO

Una volta costruito il generatore a magneti permanente sono state effettuate su di esso una serie di misurazioni, al fine di accertare che il suo comportamento elettromagnetico sia conforme a quello previsto dalle simulazioni effettuate mediante software FEMM.

Le misurazioni effettuate si possono suddividere in due grandi famiglie ovvero:

- Misure di tensione
- Misure di coppia

Le misure di tensione sono state effettuate tramite **multimetro** elettronico e **oscilloscopio digitale**, al fine di stimare ampiezza e forma d'onda della tensione generata dalla microturbina in diverse condizioni di carico.

Le misure di coppia sono state effettuate mediante apposito strumento di misurazione denominato **torsiometro** meccanico, anche in questo caso sono state esaminate diverse condizioni di carico.

Dopo questa anticipazione si procede passo passo alla descrizione di tutte le misurazioni effettuate e dei risultati da esse forniti.

5.1 MISURA DI TENSIONE A VUOTO

Una volta realizzato il generatore a magneti permanente si è proceduto alla misurazione della forza elettromotrice a vuoto da esso generata, al fine di verificare che la sua ampiezza e la sua forma d'onda coincidano con i valori ottenuti dalle simulazioni fatte con il programma FEMM. Per eseguire la prova a vuoto sono state utilizzate le seguenti apparecchiature:

- **Alimentatore Stabilizzato**

Viene alimentato dalla tensione di rete (220 [V] 50 [Hz]) ed è in grado di fornire una tensione continua in uscita regolabile manualmente mediante manopola da 0 a 30 [V]. Prevede inoltre un controllo in corrente per permettere all'operatore di imporre al carico il valore di corrente desiderato, con un range che va da 0 a 1 [A].

- **Motore di trascinamento**

Per portare in rotazione il rotore del generatore costruito e per fornire ad esso la necessaria potenza meccanica è stato utilizzato un motore in continua a magneti permanente avente tensione nominale pari a 12 [V].

La massima velocità di rotazione alla quale si può portare è risultata pari a circa 170 [rad/s]; anche questo motore così come gli altri componenti è stato reperito in laboratorio di Azionamenti Elettrici.

- ***Oscilloscopio digitale***

È stato utilizzato per visualizzare la forma d'onda della forza elettromotrice generata; essendo dotato di microprocessore interno è stato possibile salvare i valori di tensione misurati in funzione del tempo ed eseguirne una copia in chiavetta USB per una successiva rielaborazione dei dati mediante foglio elettronico.

Il montaggio del circuito è stato piuttosto semplice, dopo aver collegato l'alimentatore stabilizzato al motore DC è stata effettuata la connessione meccanica con il rotore del microgeneratore mediante un giunto meccanico appositamente realizzato su misura; infine i due terminali d'uscita del primo avvolgimento sono stati connessi al canale CH1 dell'oscilloscopio digitale, mentre i terminali d'uscita del secondo avvolgimento sono stati connessi al canale CH2.

Sia il motore DC che il generatore sono stati fissati al tavolo con del nastro di carta, in modo tale da ridurre al minimo le vibrazioni dovute alla rotazione.

Nella sottostante figura viene riportata la foto del circuito montato per l'esecuzione della misura di tensione a vuoto eseguita sul generatore a magneti permanente realizzato:

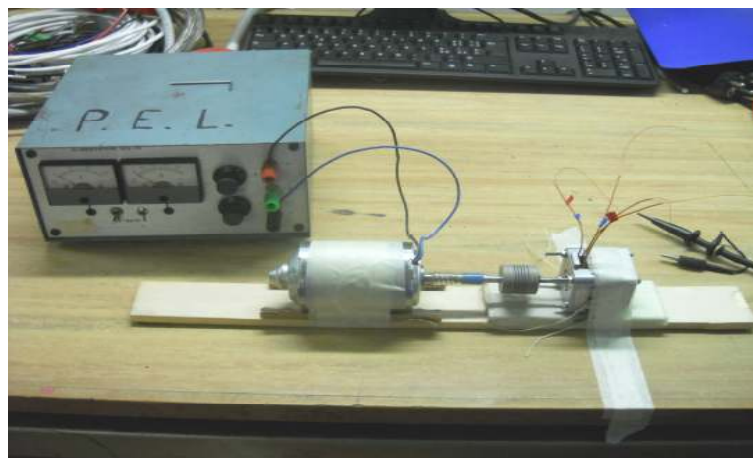


Fig. 5.1: Circuito per la misurazione della tensione a vuoto

Forza elettromotrice a vuoto

La tensione generata a vuoto su ciascuno dei due avvolgimenti, visualizzata tramite oscilloscopio digitale e rielaborata in EXCEL, viene riproposta nella sottostante figura:

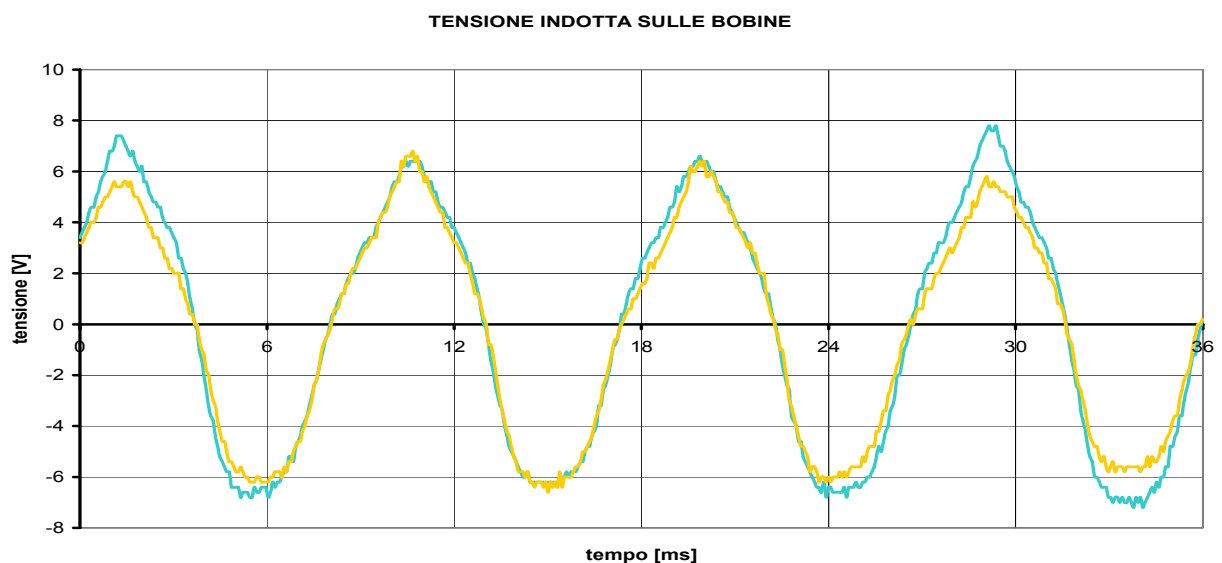


Fig. 5.2: Tensione generata a vuoto su ciascuno dei due avvolgimenti

Osservando la Fig.5.2 si nota che le tensioni indotte sulle due bobine presentano forme d'onda quasi sovrapponibili, questo dimostra che gli avvolgimenti sono stati costruiti correttamente; inoltre l'andamento grafico delle forze elettromotrici è molto prossimo alla forma sinusoidale, pur presentando picchi e valli in corrispondenza al valore massimo e al valore minimo.

Il valore massimo raggiunto dalla tensione indotta sul primo avvolgimento è risultato pari a:

$$E_{1M} = 7.8 \quad [V]$$

Mentre il valore massimo raggiunto dalla forza elettromotrice indotta nel secondo avvolgimento di statore è risultato pari a:

$$E_{2M} = 6.9 \quad [V]$$

Per quanto riguarda la frequenza della tensione generata occorre precisare che la velocità massima di rotazione alla quale è stato portato il rotore del generatore mediante motore DC è risultata pari a:

$$\omega_m = 170 \quad [rad/s]$$

Pertanto la corrispondente pulsazione elettrica della tensione generata deve risultare pari a:

$$\omega_e = 2p \cdot \omega_m = 4 \cdot 170 = 680 \quad [rad/s]$$

Di conseguenza la frequenza della forza elettromotrice indotta negli avvolgimenti di statore deve essere pari a:

$$f = \frac{\omega_e}{2\pi} = \frac{680}{2\pi} = 108.23 \quad [Hz]$$

Dai grafici delle tensioni in funzione del tempo riportati in Fig.4.19 il periodo ricavato è risultato pari a:

$$T = 9.26 \quad [ms]$$

Pertanto la frequenza corrispondente dovrà di conseguenza essere pari a:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{9.26 \cdot 10^{-3}} = 107.99 \quad [Hz]$$

Si è quindi verificato che la frequenza delle forze elettromotrici generate coincide perfettamente con il valore ottenuto dalle simulazioni eseguite mediante software FEMM.

La presenza di picchi e valli nei grafici delle tensioni generate in funzione del tempo sono probabilmente dovuti al fatto che il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ si annulla per due differenti posizioni del rotore durante un passo polare; in altre parole quando la forza elettromotrice raggiunge il valore di picco positivo l'angolo meccanico assume il valore $\theta_m = k \cdot \pi$, mentre quando la tensione raggiunge il valore di picco negativo il flusso si annulla per valori dell'angolo meccanico $\theta_m = k \cdot \frac{\pi}{4}$, ovvero quando le salienze del rotore si trovano a cavallo dei magneti permanenti posti sullo statore.

In realtà sarebbero necessari studi e analisi ben più accurate per poter affermare con certezza che l'andamento grafico delle forze elettromotrici generate presentano un andamento non perfettamente sinusoidale per questo motivo, tuttavia tra le varie ipotesi che si possono formulare, questa sembra essere la più accreditata.

Il passo successivo è stato quello di misurare la tensione a vuoto generata dalla microturbina collegando in serie i due avvolgimenti di statore; in questo modo si era ipotizzato di ottenere una forza elettromotrice di ampiezza doppia rispetto alle due precedenti, mantenendo invece inalterata la frequenza.

Tensione generata a vuoto con avvolgimenti in serie

Nella sottostante Fig.5.3 viene riportato il grafico in funzione del tempo della tensione in uscita dal generatore a magnete permanente, visualizzata mediante oscilloscopio digitale, dopo aver connesso in serie le due bobine d statore.

Anche in questo caso la potenza meccanica necessaria è stata fornita dal motore DC a magnete permanente, alimentato mediante alimentatore stabilizzato in modo tale da raggiungere la velocità massima di 170 [rad/s].

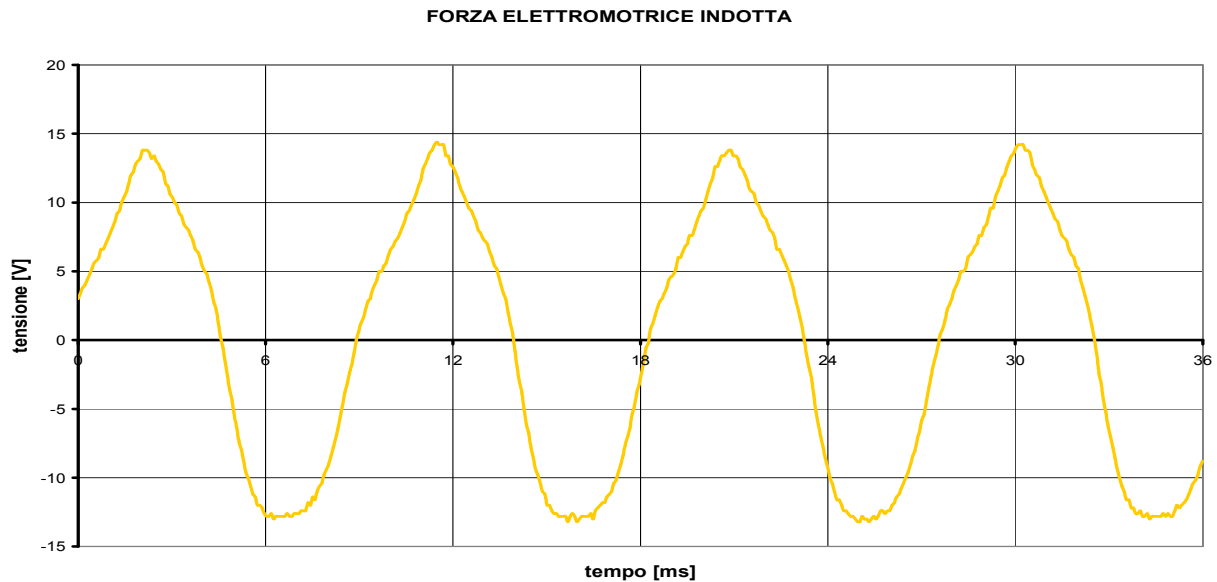


Fig. 5.3: Tensione generata a vuoto con avvolgimenti connessi in serie

Il valore massimo della tensione ottenuta dal generatore funzionante a vuoto con avvolgimenti in serie è risultato pari a $V_{0M} = 14.25$ [V], valore circa pari alla somma delle ampiezze delle tensioni ottenute su ciascuna delle due bobine; per quanto riguarda la frequenza si può verificare che è esattamente la stessa.

Per determinare il valore efficace della forza elettromotrice generata a vuoto con i due avvolgimenti in serie è stata effettuata la composizione in serie di Fourier della forma d' onda ottenuta, la cui rappresentazione grafica viene riportata nella sottostante figura:

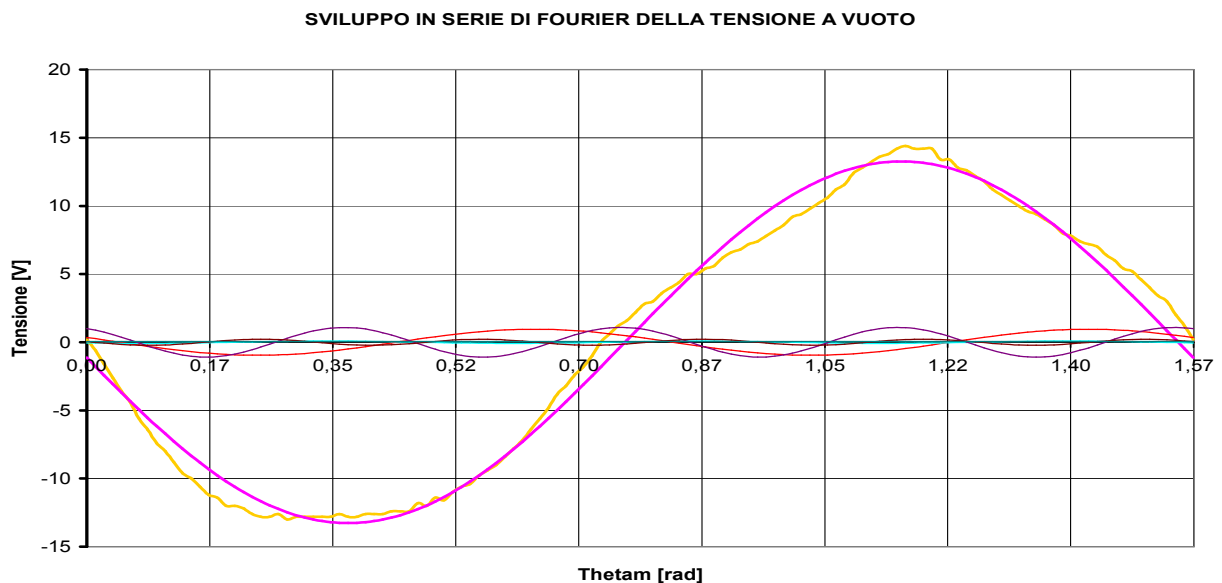


Fig. 5.4: Sviluppo in serie di Fourier della tensione a vuoto generata

Dalla scomposizione in serie di Fourier riportata in Fig.5.4 è stato possibile ricavare l' ampiezza dell' armonica fondamentale, il cui valore massimo è risultato pari a:

$$V_{1M} = 13.27 \quad [V]$$

Pertanto il corrispondente valore efficace sarà certamente pari a:

$$V_{1eff} = \frac{V_{1M}}{\sqrt{2}} = \frac{13.27}{\sqrt{2}} = 9.383 \quad [V]$$

Mentre il valore efficace della tensione generata, calcolato mediante la radice quadrata della somma dei valori efficaci al quadrato delle singole armoniche, è risultato pari a:

$$V_{0eff} = \sqrt{V_{0m}^2 + \sum_{k=1}^n V_{keff}^2} = 9.438 \quad [V]$$

Il quale è stato calcolato automaticamente implementando lo script in codice Matlab già utilizzato durante l' analisi del modello effettuata mediante software FEMM.

Sono stati inoltre stimati due parametri di notevole importanza al fine della valutazione del grado di distorsione della forma d' onda della forza elettromotrice generata, ovvero il **Fattore di distorsione armonica** che è risultato pari a:

$$F_{dis} = 1.038$$

Mentre il **Total Harmonic Distortion** è risultato pari al seguente valore:

$$THD = 11.06\%$$

La tensione generata dal generatore a magneti permanente, pur non essendo perfettamente sinusoidale, è caratterizzata da un indice di distorsione armonica modesto, questo consente di affermare che i risultati forniti dalle simulazioni sono veritieri e che il generatore costruito è di buona qualità!

5.2 MISURA DI TENSIONE CON CARICO RESISTIVO

Dopo aver misurato la forza elettromotrice generata a vuoto si è proceduta alla misura della tensione e della corrente su un carico puramente resistivo, la cui resistenza nominale è stata scelta pari a 100 $[\Omega]$.

Come già accennato in precedenza tale valore di resistenza di carico deriva dal compromesso di due opposte necessità: una è quella di ottenere un valore di corrente circolante negli avvolgimenti di statore sufficientemente elevato da poter essere misurato, l' altra è quella di garantire che almeno il 70% della tensione generata venga applicata al carico, limitando quindi le cadute ohmiche sulle resistenze interne degli avvolgimenti.

Il circuito necessario ad eseguire la misura di tensione su carico resistivo è del tutto analogo a quello impiegato nella misurazione della tensione a vuoto: l' alimentatore stabilizzato alimenta il motore DC a magneti permanente il quale porta in rotazione il rotore del generatore fino alla velocità massima di 170 $[\text{rad/s}]$, la tensione indotta nei due avvolgimenti di statore connessi in serie viene applicata al resistore di carico, dando luogo alla circolazione di una corrente alternata il cui valore efficace sarà circa pari a:

$$I_R = \frac{V_{0eff}}{R + 2 \cdot R_i} = \frac{9.438}{100 + 2 \cdot 6.3} = 0.0838 \quad [A]$$

Il valore di corrente così stimato non tiene conto delle reattanze induttive degli avvolgimenti di statore, non perchè siano trascurabili, ma perchè l' obiettivo prefissato è stimare l' ordine di

grandezza della corrente circolante e non ottenerne una valore di assoluta precisione. Il valore della resistenza R_i delle bobine era stato già misurato in precedenza mediante multimetro elettronico in fase di progettazione del convertitore AC/DC da associare alla microturbina. Nella sottostante figura viene riportata la foto raffigurante il circuito montato per effettuare la misurazione di tensione e corrente con carico puramente resistivo:

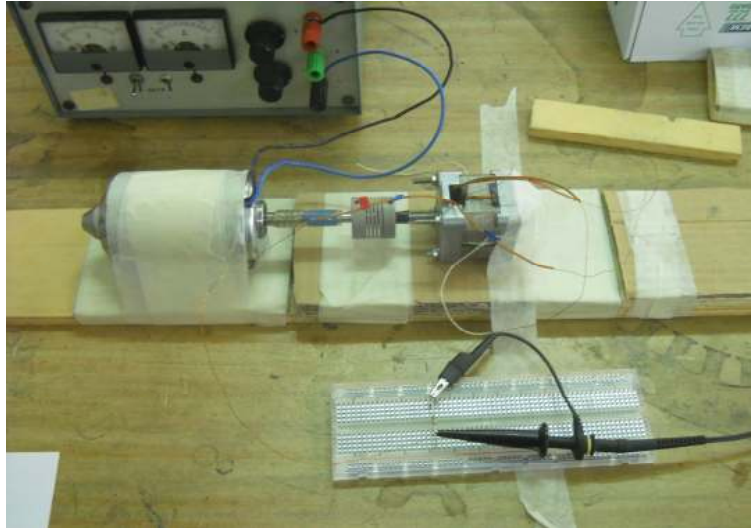


Fig. 5.5: Circuito per la misurazione di tensione su carico resistivo

Tensione applicata al carico

La forma d'onda della tensione generata dal generatore a magnete permanente e direttamente applicata al carico è stata visualizzata mediante oscilloscopio digitale; come si può osservare dalla sottostante Fig.5.6 il suo andamento in funzione del tempo è del tutto analogo a quello della forza elettromotrice a vuoto precedentemente analizzata:

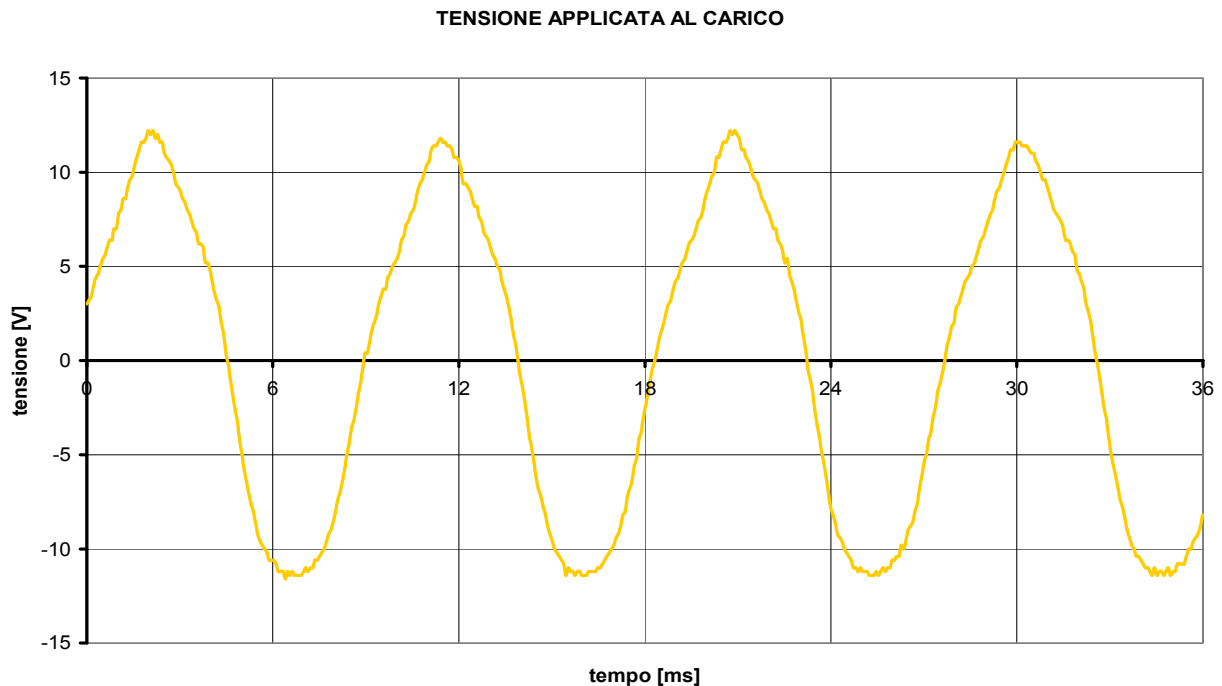


Fig. 5.6: Tensione applicata al carico resistivo

La presenza di una corrente alternata di ampiezza modesta non sembra quindi modificare più di tanto l'andamento della tensione in uscita dal generatore e direttamente applicata al carico resistivo; il valore di picco della tensione è risultato pari a:

$$V_{RM} = 11.81 \quad [V]$$

Al fine di determinare il valore efficace della tensione sul carico si è proceduto ad effettuare la scomposizione in serie di Fourier della forma d'onda riportata in Fig.5.7, in modo tale da determinare l'ampiezza dell'armonica fondamentale:

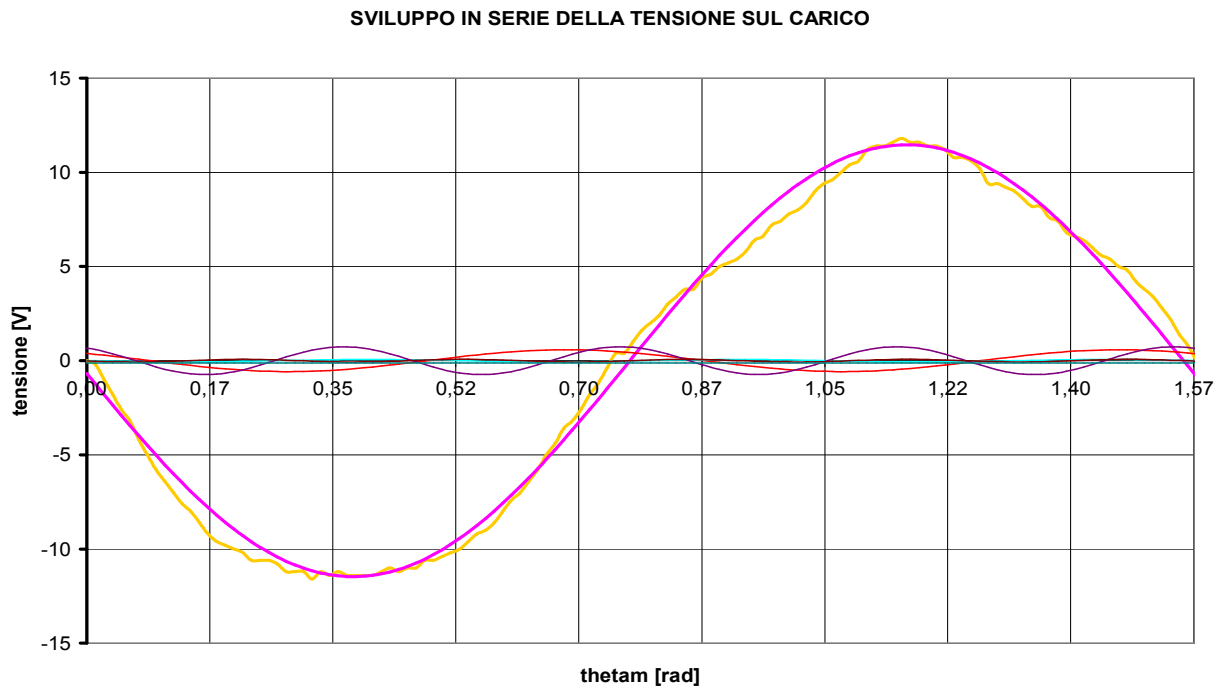


Fig. 5.7: Sviluppo in serie di Fourier della tensione applicata al carico

Dallo sviluppo in serie di Fourier sopra riportato si nota che l'ampiezza massima della prima armonica è risultata pari a:

$$V_{1RM} = 11.47 \quad [V]$$

Il corrispondente valore efficace risulterà quindi pari a:

$$V_{1eff} = \frac{V_{1RM}}{\sqrt{2}} = \frac{11.47}{\sqrt{2}} = 8.11 \quad [V]$$

Pertanto il valore efficace della corrente che attraversa il carico resistivo (supponendo la forma d'onda della tensione perfettamente coincidente con la sua prima armonica) può essere stimata nel seguente modo:

$$I_{Reff} = \frac{V_{1eff}}{R} = \frac{8.11}{100} = 0.0811 \quad [A]$$

Valore molto prossimo a quello inizialmente determinato analiticamente!

Per quanto riguarda il fattore di distorsione armonica F_{dis} , il risultato fornito dall'implementazione dello script in codice Matlab è risultato pari a:

$$F_{dis} = 0.6788$$

Mentre l'altro parametro che indica il grado di distorsione della forma d'onda, ovvero il **Total harmonic distortion** è risultato pari a:

$$THD = 8.37\%$$

5.3 MISURA DI TENSIONE CON CONVERTITORE AC/DC

L'ultima misurazione di tensione da effettuare consiste nel rilevare mediante oscilloscopio digitale la forma d'onda della tensione generata dalla microturbina e applicata ad un carico puramente resistivo mediante il convertitore AC/DC precedentemente costruito.

Lo schema di principio da seguire per la realizzazione della misura viene riportato nella sottostante figura:

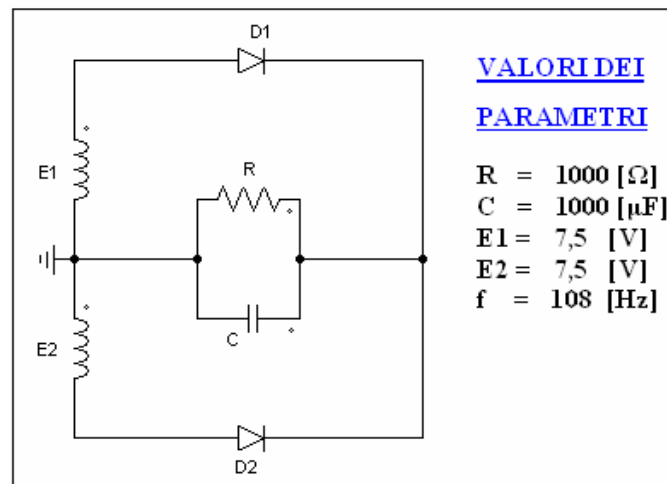


Fig. 5.8: Misura di tensione in uscita dal convertitore AC/DC

Il valore di resistenza di carico è stato stabilito in sede di progettazione del raddrizzatore in modo tale da ottenere il valore di ripple prefissato (0.1%). Come si può osservare nello schema di principio sopra riportato, le due induttanze indicate con E1 ed E2 rappresentano gli avvolgimenti di statore sedi di forza elettromotrice indotta.

Il circuito realizzato per la misura di tensione raddrizzata è molto semplice: l'alimentatore stabilizzato alimenta il motore DC il quale porta in rotazione il rotore del generatore a magnete permanente fino a raggiungere la velocità massima di 170 [rad/s], dopodiché i terminali dei due avvolgimenti di statore vengono connessi come indicato nello schema al convertitore AC/DC.

La seguente Fig.5.9 riporta la foto del circuito realizzato per la misurazione di tensione applicata al carico resistivo mediante raddrizzatore:

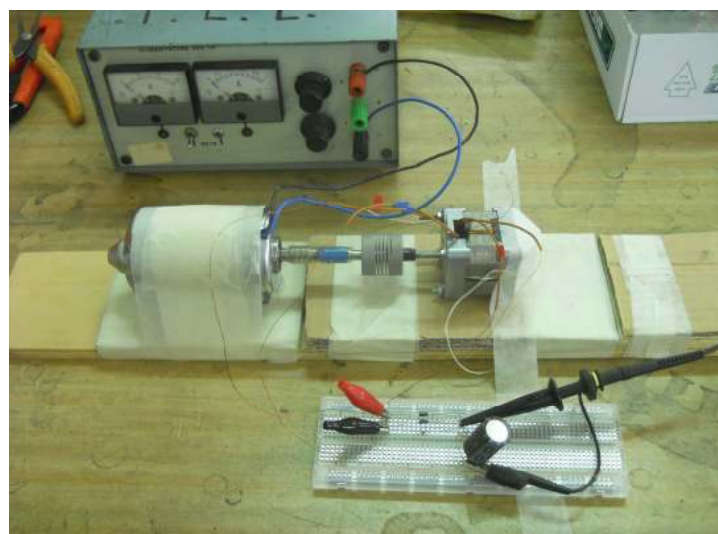


Fig. 5.9: Circuito per misura di tensione in uscita dal raddrizzatore

Tensione in uscita dal raddrizzatore

La forma d'onda della tensione generata dal generatore a magnete permanente e applicata ad un carico resistivo di resistenza pari a 1000 [Ω] mediante il convertitore AC/DC realizzato, viene riportata nella figura seguente:

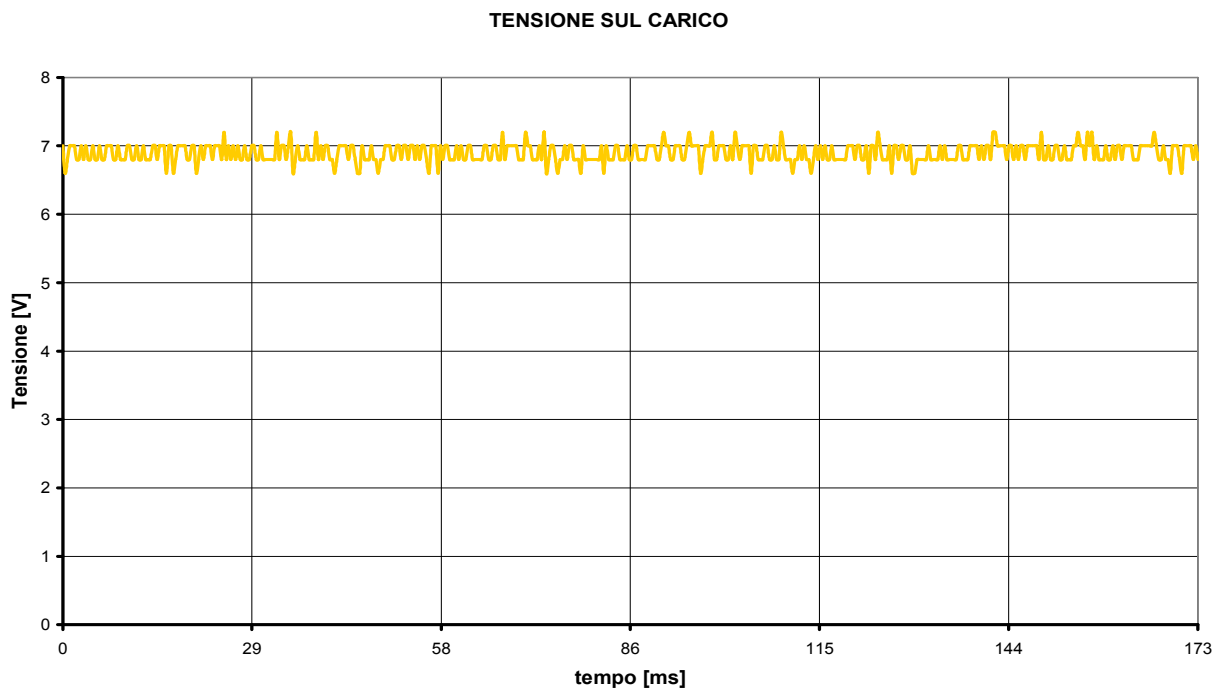


Fig. 5.10: Tensione raddrizzata e applicata al carico resistivo

Il valore della tensione continua in uscita dal raddrizzatore e applicata al carico resistivo è risultato pari a:

$$V_R = 6.85 \quad [V]$$

Mentre l'intensità di corrente che attraversa il carico resistivo è risultato pari a:

$$\frac{V_R}{R} = \frac{6.85}{1000} = 6.85 \quad [mA]$$

Valore leggermente superiore alla corrente nominale del filo di rame utilizzato per la costruzione degli avvolgimenti, pari a circa 500 [mA].

5.4 MISURA DI COPPIA A VUOTO

Dopo aver eseguito le misure di tensione previste al fine di accertare che la forza elettromotrice generata dal generatore a magnete permanente nelle diverse condizioni di carico presenti le caratteristiche di ampiezza, frequenza e forma d'onda previste si è proceduto alla misurazione della coppia agente sul rotore del generatore nelle diverse condizioni di carico.

Le misure di coppia sono state effettuate mediante torsionometro meccanico, le cui caratteristiche principali vengono qui di seguito riportate:

dati di targa del torsionometro:

- Coppia massima: $T_{max} = 1$ [Nm]
- Sensibilità: $e_T = 5$ [mV/Nm]
- Costante di proporzionalità: $K = 0.2$ [Nm/V]
- Range di tensione: $20 \div 30$ [V]
- Codice identificativo: TMB 304/411

Dalle simulazioni effettuate sul generatore mediante software FEMM è emerso che il valore massimo di coppia agente sul rotore nelle diverse condizioni di carico è di circa 0.02 [Nm], mentre il torsionometro utilizzato prevede una coppia nominale pari ad 1 [Nm], di conseguenza le misure di coppia effettuate risulteranno affette da errore relativo molto elevato.

Per eseguire misure caratterizzate da basso errore relativo si dovrebbero utilizzare strumenti molto più precisi e raffinati, strumenti che purtroppo non sono presenti in laboratorio di Azionamenti elettrici.

Coppia a vuoto a velocità minima

Si procede ora alla misurazione della coppia agente sul rotore del generatore costruito quando funziona a vuoto a velocità minima.

Il circuito realizzato per l'esecuzione della prova è costituito da un alimentatore stabilizzato, un motore DC a magnete permanente avente tensione nominale di 12 [V], il torsionometro precedentemente descritto ed un oscilloscopio digitale.

L'alimentatore stabilizzato alimenta il motore connesso mediante giunto meccanico al torsionometro, portandolo in rotazione ad una velocità minima di circa 10 [rad/s]; dopodiché il torsionometro meccanico connesso al rotore del generatore acquisisce il valore di coppia fornita dal motore e dà in uscita una tensione proporzionale al valore di coppia rilevato.

La tensione generata dal torsionometro viene acquisita dall'oscilloscopio digitale, in modo da consentire all'operatore di visualizzarne la forma d'onda e memorizzarne i valori in funzione del tempo su chiavetta USB per una successiva rielaborazione mediante foglio elettronico EXCEL.



Fig. 5.11: Misura della coppia a vuoto mediante torsionometro meccanico

Oltre alla tensione in uscita dal torsionmetro l'oscilloscopio digitale acquisisce i valori della forza elettromotrice complessivamente generata dalla microturbina, nella quale gli avvolgimenti di statore sono stati connessi in serie al fine di ottenere la massima tensione in uscita.

Tensione a vuoto a velocità minima

Nella seguente figura viene riportato il grafico della forza elettromotrice in uscita dalla microturbina posta in rotazione dal motore DC alla velocità di 10.74 [rad/s] ; i valori di tensione acquisiti dall'oscilloscopio digitale sono stati rielaborati mediante foglio elettronico EXCEL:

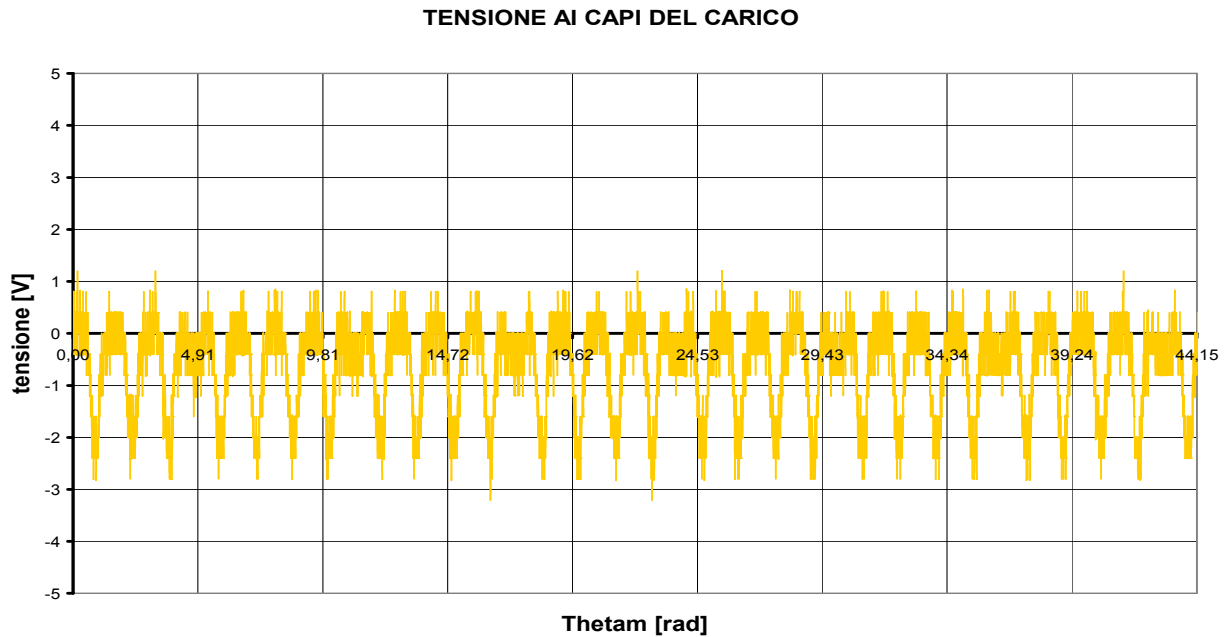


Fig. 5.12: Tensione generata a vuoto per $\Omega_m = 10.74 \text{ [rad/s]}$

Coppia a vuoto a velocità minima

L'andamento grafico della coppia in funzione del tempo agente sul rotore del generatore a magneti permanente misurata tramite torsionmetro meccanico viene riproposto nella sottostante figura:

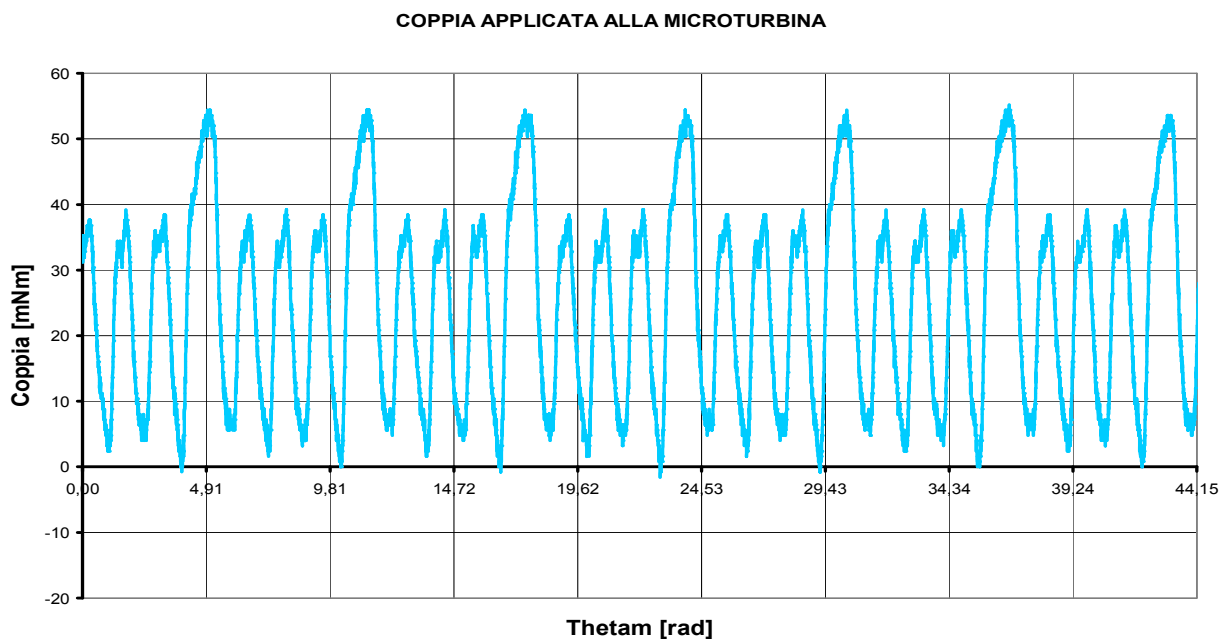


Fig. 5.13: Coppia a vuoto misurata con torsionmetro meccanico per $\Omega_m = 10.74 \text{ [rad/s]}$

Coppia di offset a velocità minima

Per coppia di offset si intende la coppia agente sull'albero del torsionometro portato in rotazione dal motore DC usato in precedenza in assenza di carico meccanico, ovvero in assenza della microturbina.

È importante conoscere la coppia di offset poichè essa altera il valore effettivo della coppia a carico agente sul rotore della microturbina misurata dal torsionometro ad una certa velocità angolare. L'andamento grafico della coppia di offset in funzione del tempo visualizzata mediante oscilloscopio digitale viene qui di seguito riportato:

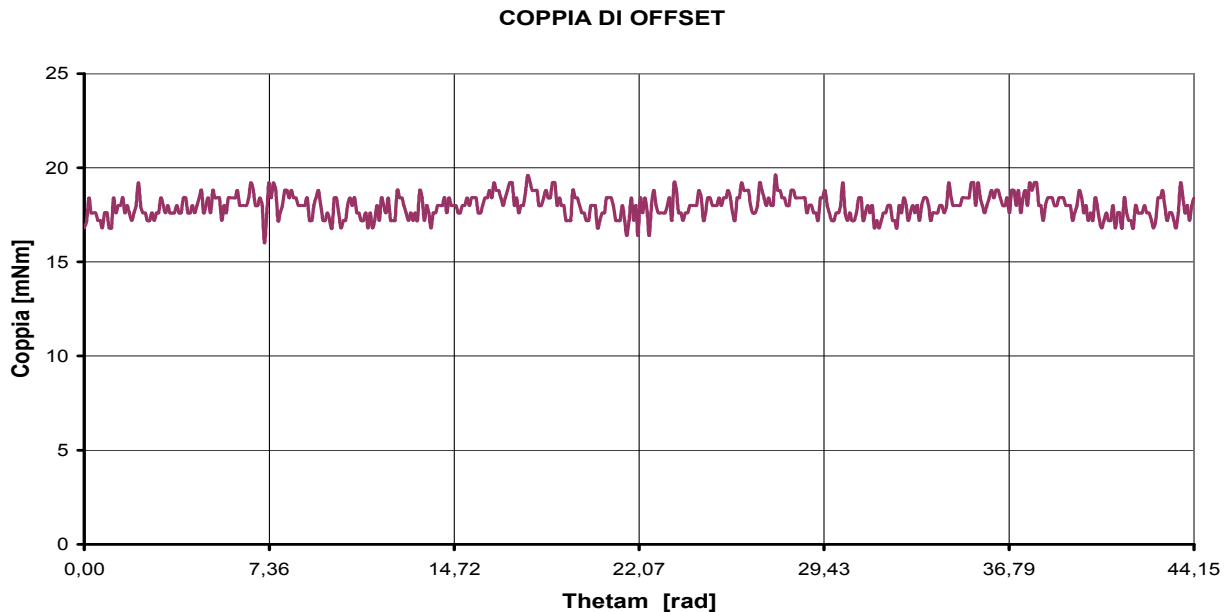


Fig. 5.14: Coppia di offset misurata con torsionometro meccanico per $\Omega_m = 10.74$ [rad/s]

Coppia a vuoto a velocità minima al netto dell'offset

La coppia al netto dell'offset viene ricavata sottraendo ai valori di coppia a vuoto i corrispondenti valori di coppia di offset misurati con torsionometro meccanico per una certa velocità angolare.

La coppia netta alla velocità minima viene riportata in Fig.5.15:

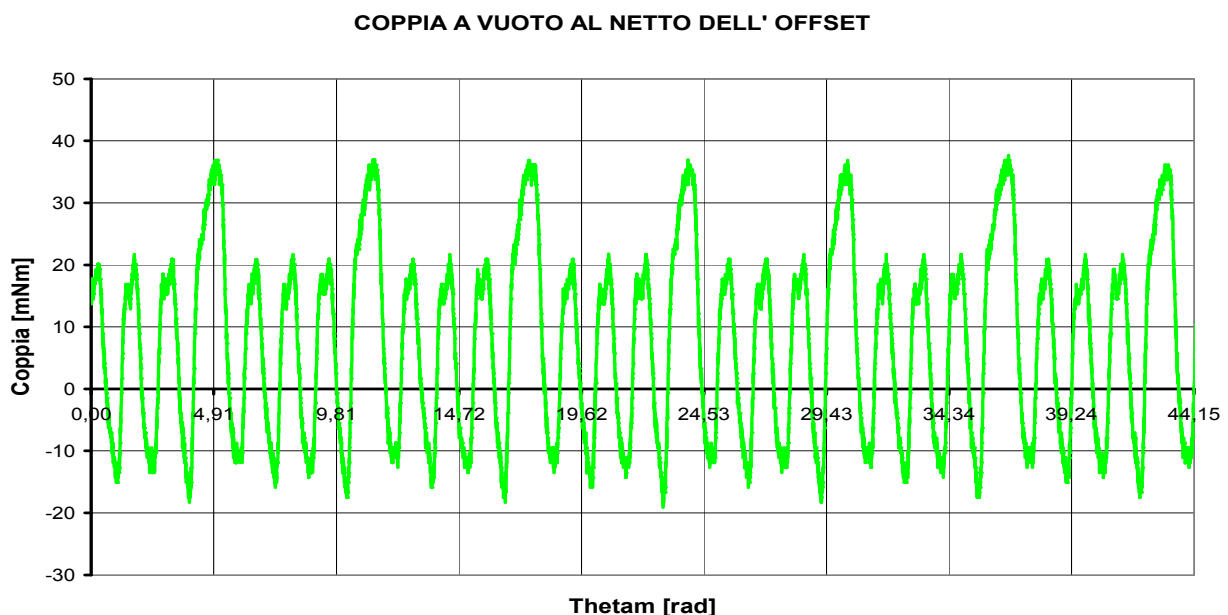


Fig. 5.15: Coppia al netto dell'offset misurata per $\Omega_m = 10.74$ [rad/s]

Osservando la figura precedente si nota che il valore medio della coppia netta a vuoto a velocità minima risulta essere pari a:

$$T_m = 1.31 \quad [mNm]$$

Mentre la massima oscillazione di coppia a vuoto è risultata pari al seguente valore:

$$\Delta T = 51.2 \quad [Nm]$$

A titolo di confronto si riporta nella sottostante figura il grafico della coppia in funzione della posizione angolare del rotore descritta dal parametro θ_m , ottenuto dalle simulazioni effettuate mediante il programma FEMM in fase di analisi del modello progettato:

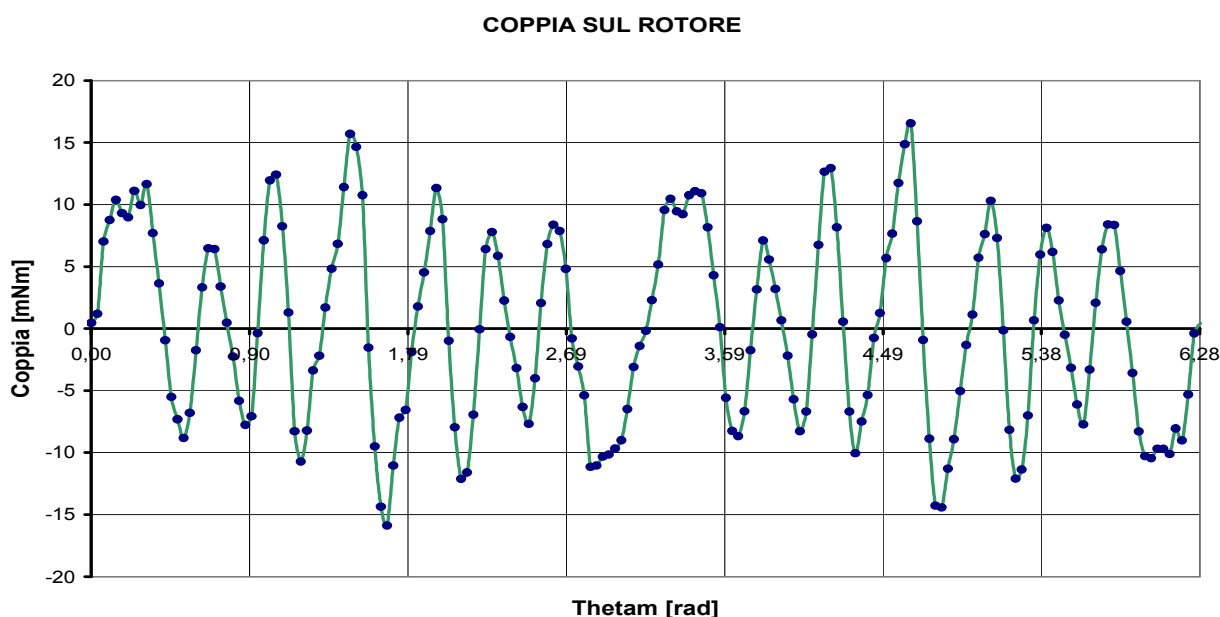


Fig. 5.16: Coppia a vuoto ottenuta dall'analisi del modello definitivo mediante software FEMM

Confrontando il grafico della coppia a vuoto ottenuta mediante il programma di simulazione ed il grafico ottenuto mediante misurazione con torsiometro meccanico si nota una certa somiglianza: entrambi presentano un andamento oscillante, ed il valore di picco si ottiene in corrispondenza a $\theta_m = k\frac{\pi}{4}$ ovvero quando le espansioni polari di rotore si trovano a cavallo dei magneti permanenti posti sullo statore.

Il valore medio di coppia a vuoto ottenuto dalla simulazione mediante codice FEMM è risultato pari a:

$$T_m = 0.05 \quad [mNm]$$

Mentre la massima oscillazione di coppia ottenuta dalla simulazione a vuoto è risultata pari a:

$$\Delta T = 31.5 \quad [mNm]$$

Valori di coppia misurati e valori di coppia simulati non sono perfettamente coincidenti ma risultano comunque abbastanza simili, poichè sono dello stesso ordine di grandezza.

La misurazione di coppia a vuoto mediante torsiometro meccanico ha dato esiti soddisfacenti, dando prova che i risultati ottenuti tramite programma di simulazione sono del tutto veritieri!

Si procede ora alla determinazione dell'andamento della coppia agente sul rotore del generatore a magnete permanente a vuoto alla velocità massima corrispondente a 154.12 [rad/s]; ottenuta mediante l'ausilio del motore DC alimentato alla tensione massima ammissibile.

Tensione a vuoto a velocità massima

Nella seguente Fig.5.17 viene riportata la forma d'onda della tensione a vuoto visualizzata tramite oscilloscopio digitale quando il rotore del generatore ruota alla massima velocità raggiungibile:

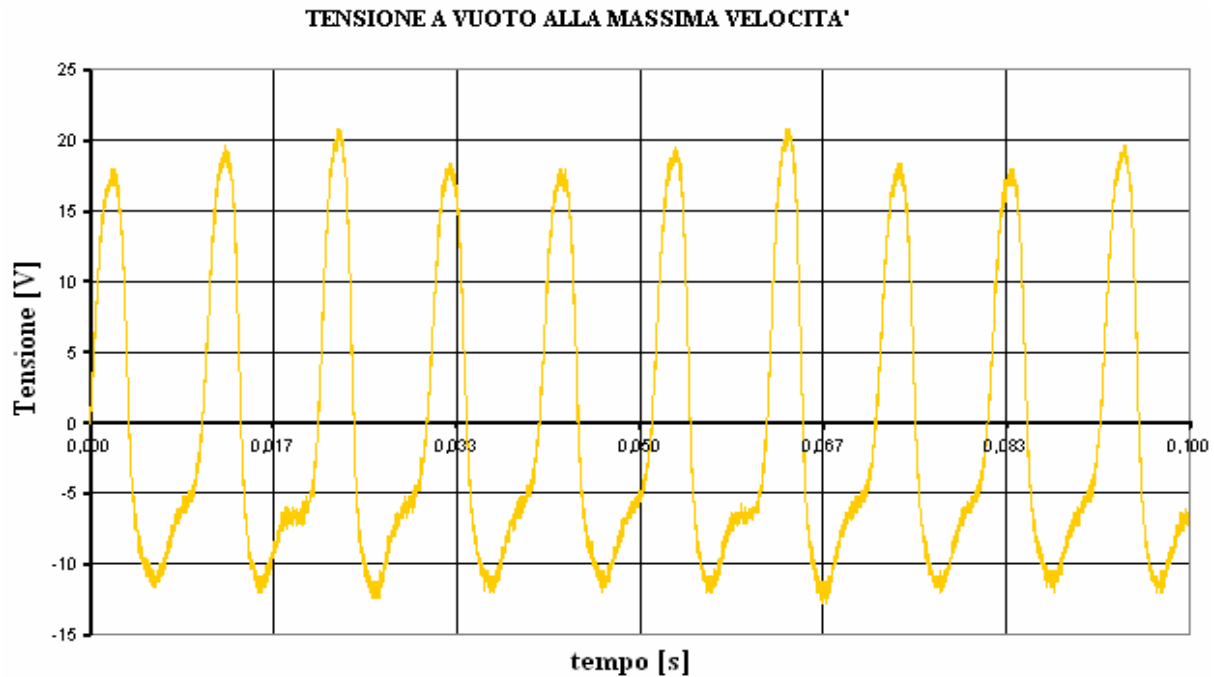


Fig. 5.17: Tensione a vuoto rilevata mediante oscilloscopio per $\omega_m = 154.12$ [rad/s]

Coppia a vuoto a velocità massima

Si riporta nella figura sottostante la coppia a vuoto agente sul rotore del generatore costruito quando ruota alla massima velocità; i valori di coppia misurati con il torsiometro meccanico sono stati convertiti in corrispondenti valori di tensione e successivamente visualizzati mediante oscilloscopio digitale.

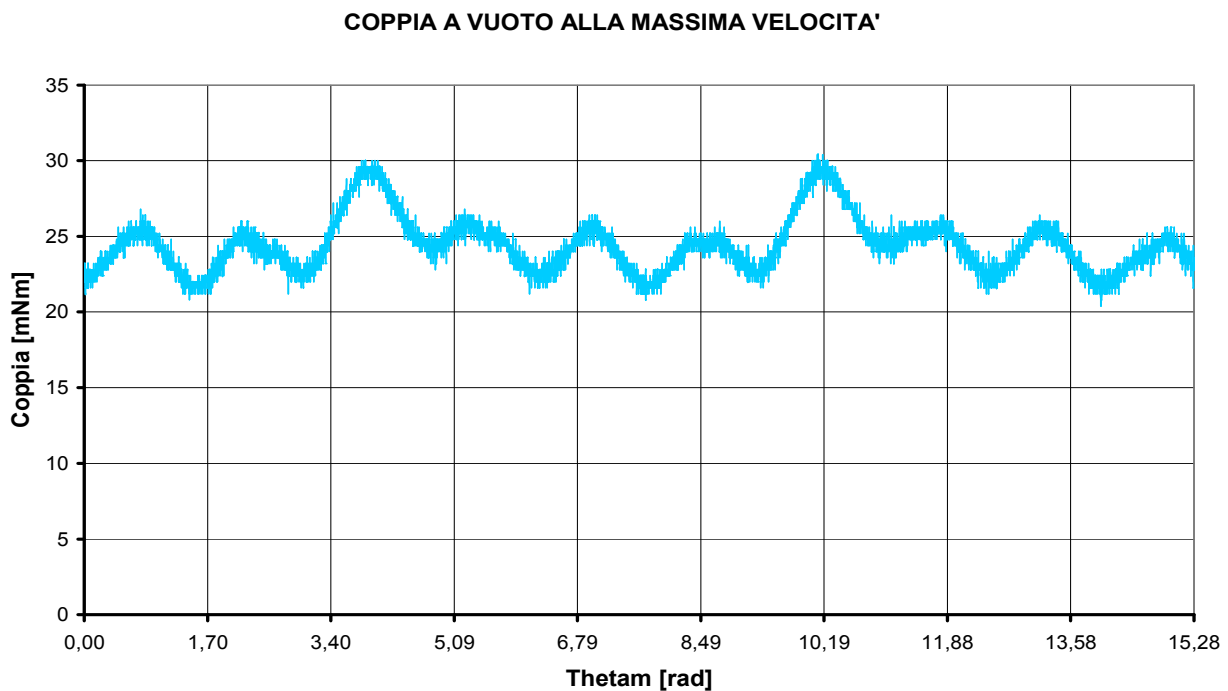


Fig. 5.18: Coppia a vuoto misurata con torsiometro meccanico per $\omega_m = 154.12$ [rad/s]

Coppia di offset a velocità massima

Nella sottostante figura si riporta il valore della coppia di offset misurata con torsiometro meccanico in assenza del generatore, per una velocità angolare imposta dal motore DC pari a 154.12 [rad/s].

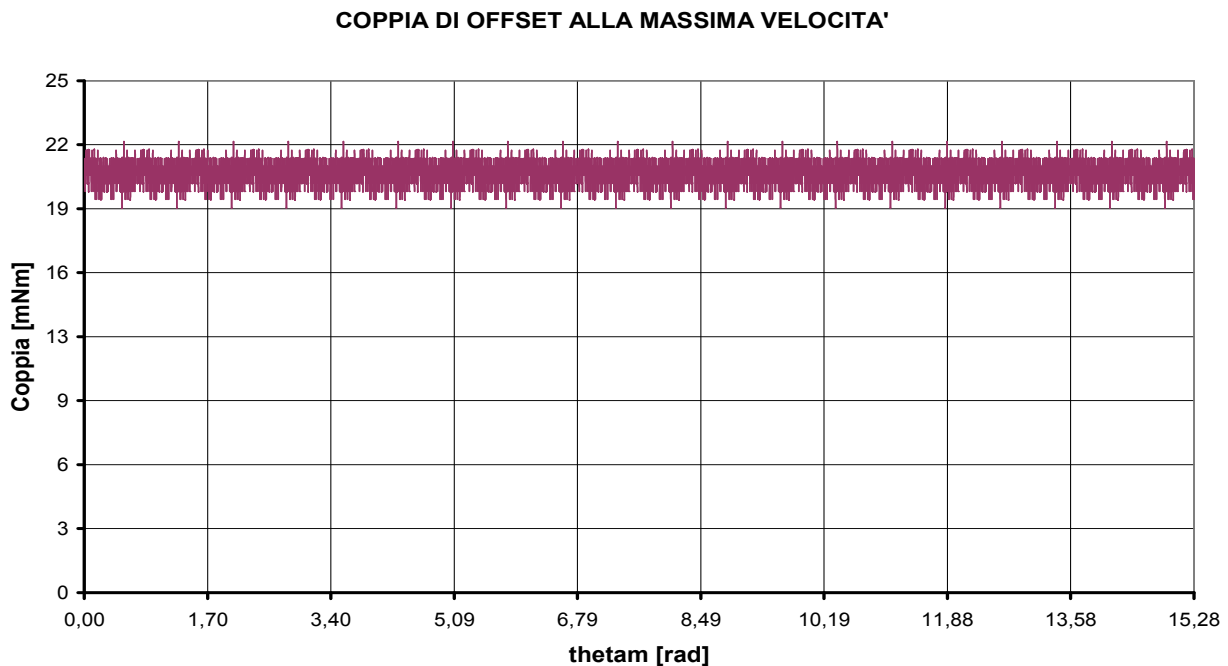


Fig. 5.19: Coppia di offset misurata con torsiometro meccanico per $\omega_m = 154.12$ [rad/s]

Coppia a vuoto a velocità massima al netto dell' offset

La coppia netta a vuoto alla velocità massima è stata ottenuta come differenza tra i valori di coppia a vuoto ed i valori di coppia di offset, misurati mediante torsiometro meccanico. Il grafico della coppia netta in funzione del tempo rielaborata mediante foglio elettronico EXCEL viene riportata nella sottostante Fig.5.20:

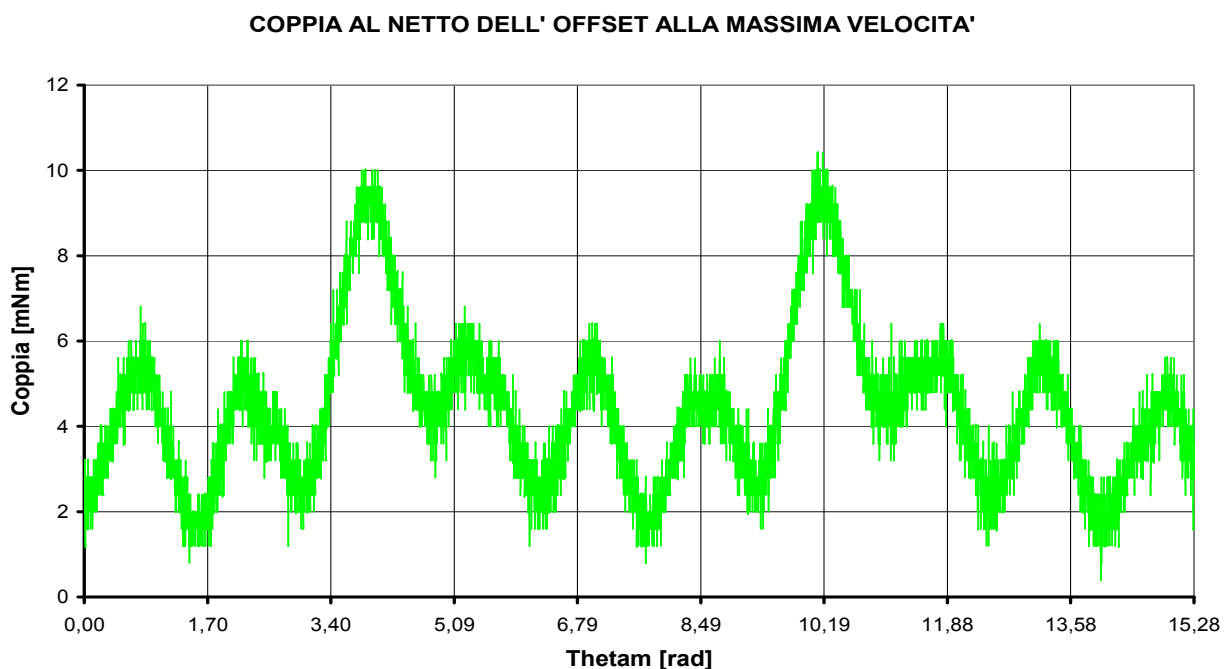


Fig. 5.20: Coppia netta a vuoto misurata con torsiometro meccanico per $\omega_m = 154.12$ [rad/s]

Osservando il grafico della coppia a vuoto al netto dell' offset precedentemente riportata si nota che il valore medio raggiunto risulta essere pari a:

$$T_m = 5.51 \quad [mNm]$$

Mentre la massima oscillazione di coppia coincide con il valore massimo, e quindi risulta essere pari a:

$$\Delta T = 11.2 \quad [mNm]$$

Si nota dunque che ad alte velocità l' andamento della coppia presenta oscillazioni più smorzate, e risultano minori anche i valori di T_m e ΔT .

Questo è dovuto al fatto che aumentando la velocità di rotazione aumenta l' inerzia del blocco in movimento, pertanto la coppia motrice applicata dal motore DC viene agevolata dalle coppie inerziali ed è quindi più facile vincere le coppie di resistenza al moto generate dai magneti permanenti.

Si ritiene opportuno confrontare la coppia a vuoto al netto dell' offset misurata mediante torsio-metro meccanico con i valori di coppia ottenuti dalla simulazione effettuata mediante programma FEMM, il cui andamento grafico in funzione dell' angolo meccanico θ_m viene qui di seguito riportato:

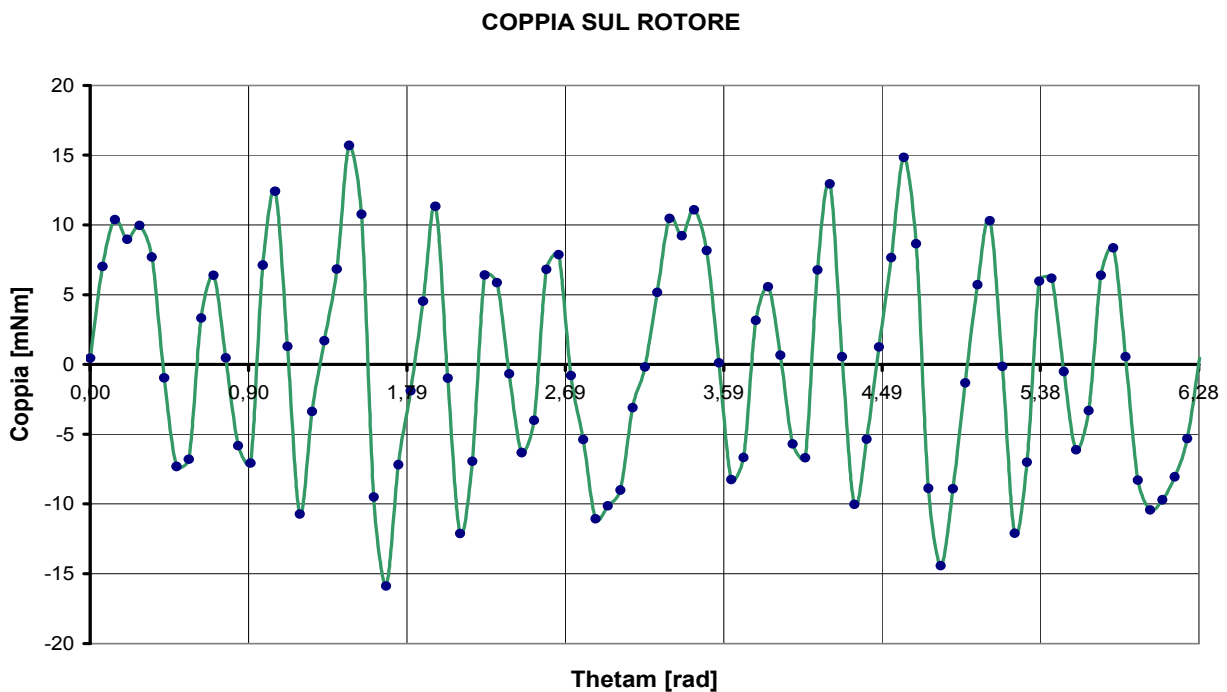


Fig. 5.21: Coppia a vuoto simulata mediante software FEMM per $\omega_m = 154.12 \text{ [rad/s]}$

Il grafico della coppia a vuoto ottenuto è perfettamente coincidente al grafico della coppia a vuoto ottenuto dalla precedente simulazione eseguita alla velocità minima, questo perchè il software FEMM esegue l' analisi del modello progettato per diverse posizioni del rotore, ma non è in grado di tenere conto della velocità di rotazione dell' albero.

Il valore medio di coppia e oscillazione di coppia sono pertanto gli stessi della Fig.5.16 ovvero:

$$T_m = 0.035 \quad [mNm]$$

$$\Delta T = 31.5 \quad [mNm]$$

É interessante notare che sia T_{max} sia ΔT si ottengono per valori di angolo meccanico corrispondenti a $\theta_m = \frac{\pi}{2}$ e $\theta_m = \frac{3}{2}\pi$, ovvero quando il flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore si annulla completamente. Per queste posizioni del rotore si ha dunque la massima intensità delle forze magnetiche generate dai magneti permanenti di statore agenti sulla superficie rotorica, pertanto in queste posizioni il generatore costruito è soggetto ad un consistente impuntamento.

5.5 MISURA DI COPPIA IN REGIME SINUSOIDALE

Una volta eseguite le misurazioni di coppia a vuoto a velocità minima e massima si è proceduto alla misurazione della coppia agente sul rotore del generatore costruito a regime sinusoidale, ovvero quando i terminali di uscita degli avvolgimenti connessi in serie alimentano un carico puramente resistivo.

Al fine di ottenere un valore di corrente sufficientemente elevato da poterne riscontrare gli effetti elettromagnetici si è optato per un valore di resistenza di carico pari a:

$$R = 5 \quad [\Omega]$$

Il circuito realizzato per effettuare la misura di coppia a regime sinusoidale presenta gli stessi componenti utilizzati in precedenza durante la misurazione della coppia a vuoto: l'alimentatore stabilizzato alimenta il motore DC a magnete permanente, il quale porta in rotazione sia l'albero del torsionometro meccanico sia il rotore del generatore costruito.

I valori di coppia rilevati dal torsionometro vengono convertiti in corrispondenti valori di tensione ed inviati all'oscilloscopio digitale per poterne visualizzare la forma d'onda, il quale acquisisce inoltre i valori della tensione a capi del carico resistivo.

Tensione ai capi del carico alla velocità minima

Nella seguente figura viene riportato l'andamento grafico della tensione ai capi del carico resistivo ottenuta per $\omega_m = 7.56$ [rad/s], ovvero la velocità minima necessaria a mantenere in rotazione il rotore della microturbina.

I valori acquisiti dall'oscilloscopio digitale sono stati successivamente rielaborati mediante foglio elettronico EXCEL:

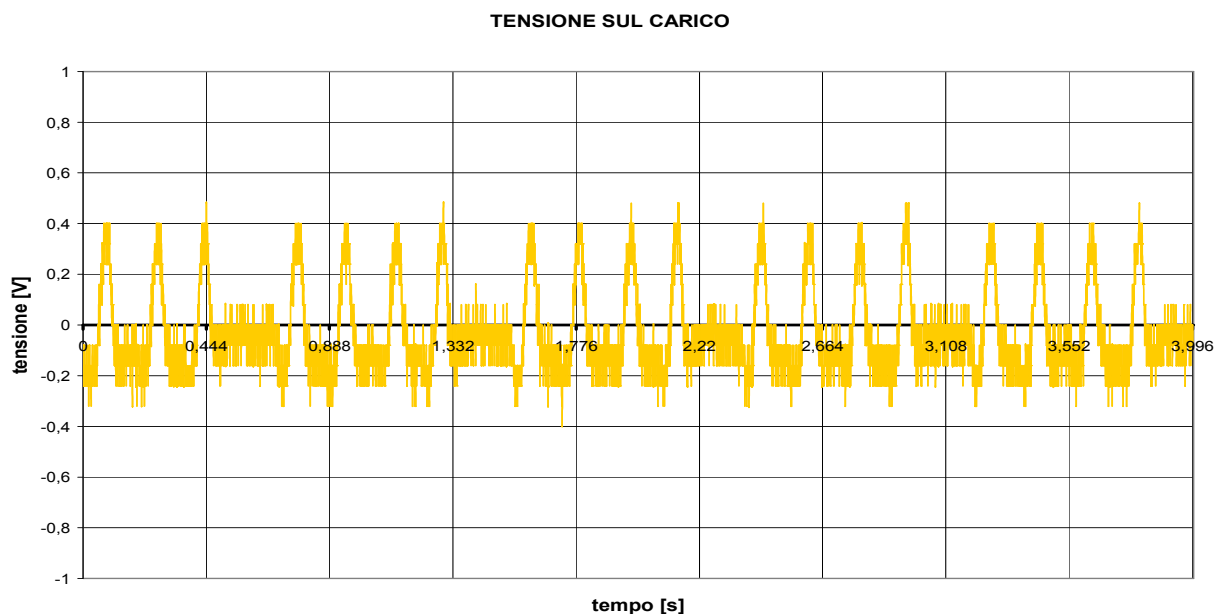


Fig. 5.22: Tensione ai capi del carico resistivo ottenuta per $\omega_m = 7.56$ [rad/s]

Dal grafico ottenuto si può riscontrare come per basse velocità l'andamento nel tempo della tensione generata sia del tutto analogo alla forma d'onda della tensione ottenuta a velocità elevate, ossia costituito da picchi e da valli.

Il valore massimo di tensione sul carico determinato dalla precedente Fig.5.22 è risultato pari a:

$$V_{RM} = 0.5[V]$$

Pertanto il massimo valore della corrente che attraversa il carico resistivo sarà pari a:

$$I_{RM} = \frac{V_{RM}}{R} = \frac{0.5}{5} = 0.1 \quad [A]$$

Il valore di corrente ottenuto è sufficientemente elevato da poter essere misurato mediante multimetro elettronico con buona precisione, ma è comunque decisamente inferiore al valore di corrente nominale del filo di rame pari a 500 [mA].

Coppia in regime sinusoidale alla velocità minima

Si riporta nella figura sottostante l'andamento grafico in funzione del tempo della coppia misurata mediante torsiometro meccanico per $\omega_m = 7.54$ [rad/s] agente sul rotore del generatore costruito quando alimenta un carico resistivo di resistenza pari a 5 [Ω].

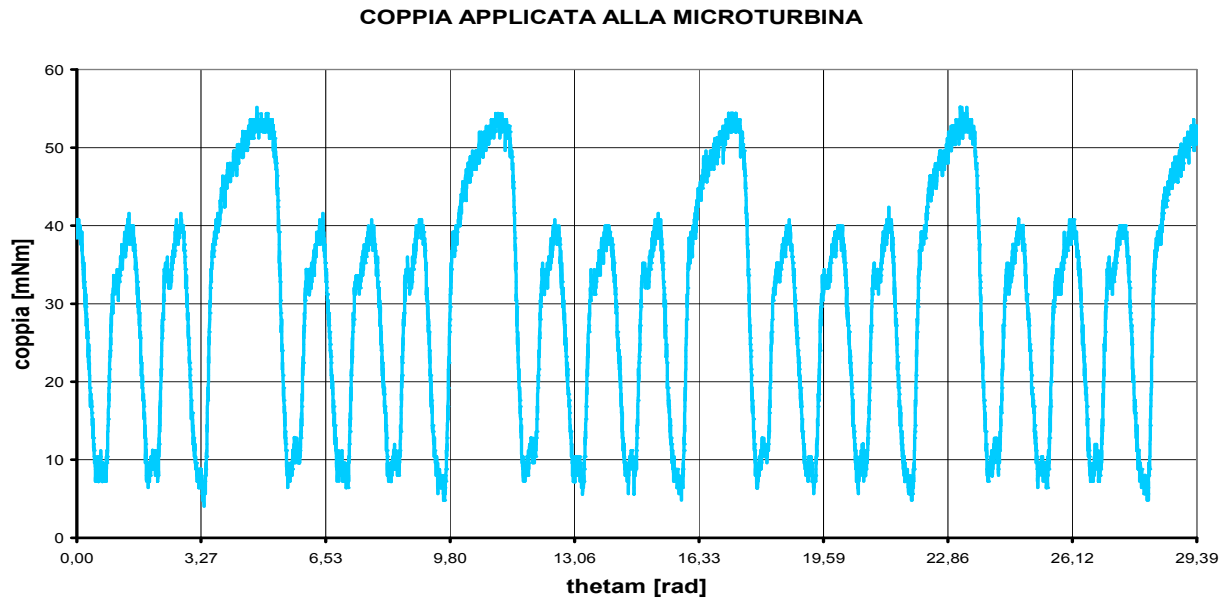


Fig. 5.23: Coppia applicata al rotore della microturbina per $\omega_m = 7.56$ [rad/s]

Coppia netta in regime sinusoidale alla velocità minima

Anche in questo caso per ottenere i valori effettivi di coppia agente sul rotore del generatore a magnete permanente costruito è necessario sottrarre ai valori di coppia misurati i corrispondenti valori della coppia di offset ottenuti alla minima velocità di rotazione; il grafico in funzione del tempo della coppia all'albero al netto dell'offset viene riportato nella seguente figura:

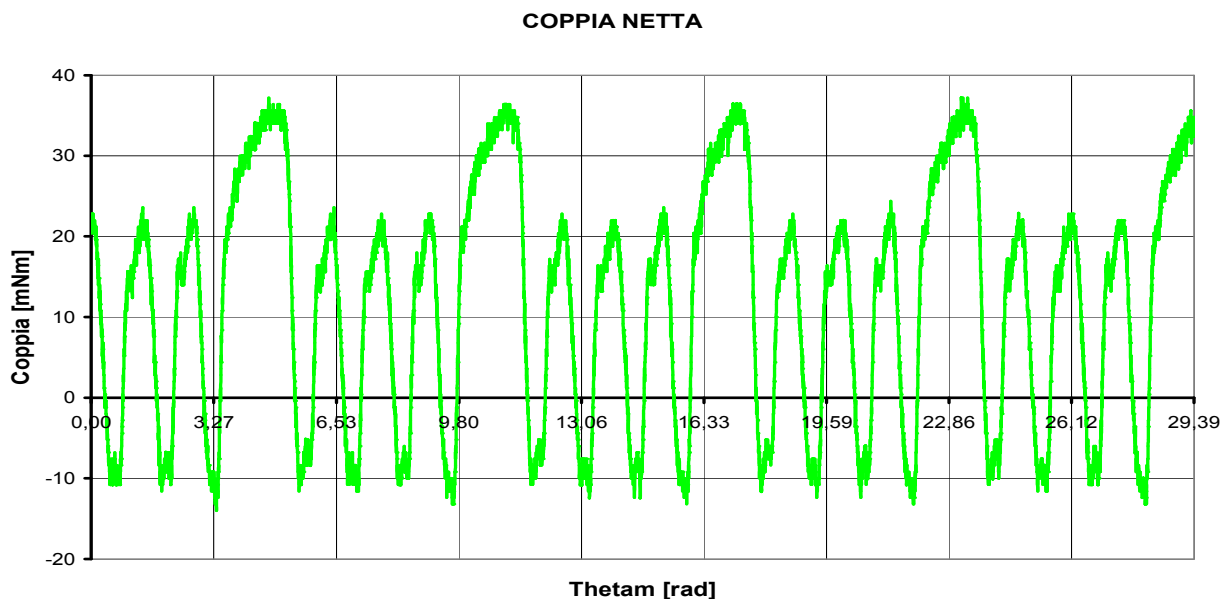


Fig. 5.24: Coppia al netto dell'offset applicata al rotore della microturbina per $\omega_m = 7.56$ [rad/s]

Dalla precedente Fig.5.24 è stato determinato il valore medio della coppia al netto dell' offset agente sul rotore del generatore a magneti permanenti costruito quando alimenta un carico resistivo, ovvero quando funziona in regime sinusoidale; tale valore è risultato pari a:

$$T_m = 11.3 \quad [mNm]$$

Mentre la massima oscillazione di coppia ottenuta alla minima velocità di rotazione raggiungibile mediante l' ausilio del motore DC a magnete permanente è risultata pari a:

$$\Delta T = 48.8 \quad [mNm]$$

A titolo di confronto si riporta qui di seguito il grafico della coppia agente sul rotore della microturbina ottenuta dalla simulazione mediante programma FEMM, naturalmente nelle stesse condizioni di carico:

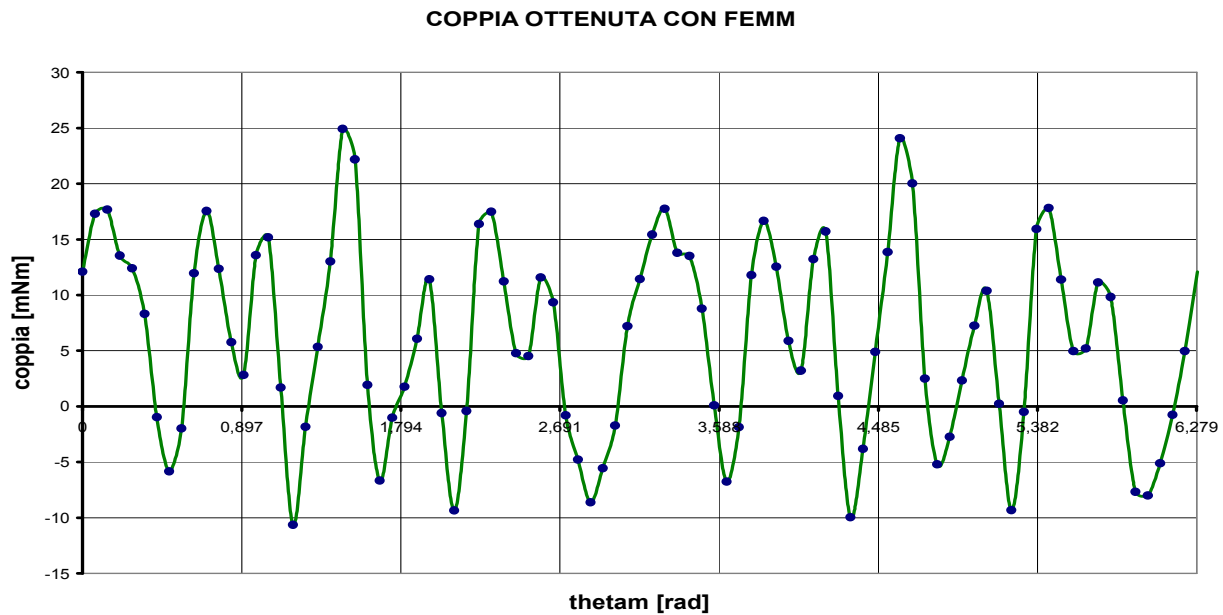


Fig. 5.25: Coppia simulata mediante software FEMM per $\omega_m = 7.56$ [rad/s] in regime sinusoidale

Confrontando l' andamento grafico della coppia misurata con la forma d' onda della coppia ottenuta dalla simulazione con il programma FEMM si può notare una certa somiglianza, poichè in entrambi i casi l' andamento della coppia risulta oscillante presentando picchi notevoli.

Il valore medio di coppia ottenuto dalla simulazione riportata in Fig.5.25 è risultato pari a:

$$T_m = 8.75 \quad [mNm]$$

Mentre il massimo valore di oscillazione di coppia ottenuto dalla simulazione del generatore in regime sinusoidale eseguita mediante programma FEMM è risultata pari a:

$$\Delta T = 37.8 \quad [mNm]$$

Confrontando i valori di T_m e di ΔT misurati con i corrispondenti valori ottenuti dalla simulazione si può riscontrare una netta somiglianza, poichè appartengono sicuramente allo stesso ordine di grandezza; si può pertanto affermare che sia i valori di coppia misurati sia quelli simulati sono del tutto veritieri!

Tensione ai capi del carico alla velocità massima

Mantenendo sempre lo stesso circuito di prova si procede ora alla misurazione della coppia agente sul rotore della microturbina trascinata dal motore DC a magnete permanente alla massima velocità di rotazione raggiungibile, in questo caso pari a 143.31 [rad/s].

Le condizioni di carico rimangono le medesime, ovvero pura resistenza di valore nominale pari a 5 [Ω] in regime sinusoidale; l'andamento in funzione del tempo della tensione ai capi del carico misurata mediante oscilloscopio digitale e successivamente rielaborata mediante foglio elettronico EXCEL viene riportata nella sottostante figura:

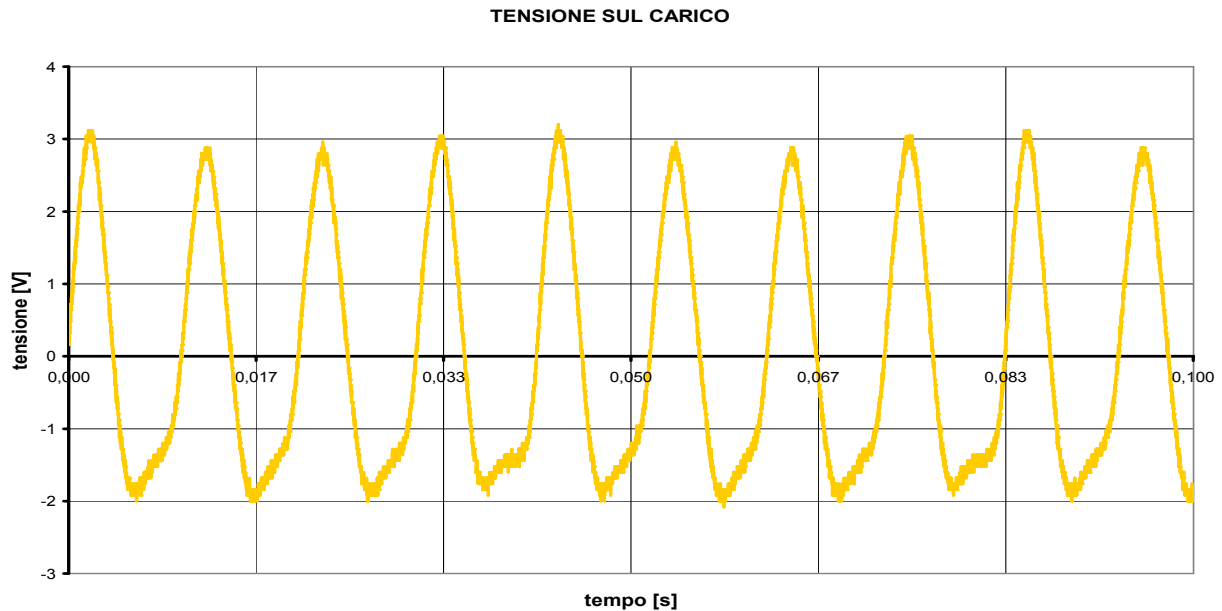


Fig. 5.26: Tensione applicata al carico per $\omega_m = 143.31$ [rad/s] in regime sinusoidale

Il valore massimo della tensione ai capi del carico ottenuta è risultata pari a:

$$V_{RM} = 3.12 \text{ [V]}$$

E quindi il valore massimo della corrente che attraversa il carico resistivo sarà pari a:

$$I_{RM} = \frac{V_{RM}}{R} = \frac{3.12}{5} = 0.624 \text{ [A]}$$

L'intensità di corrente ottenuta è maggiore del valore nominale di corrente (500 [mA]) caratteristica del filo di rame con cui sono realizzati gli avvolgimenti di statore, tuttavia trattandosi di valore massimo e non di valore efficace il tempo in cui vengono percorsi dal valore di picco della corrente è molto limitato, e quindi non rischiano di danneggiarsi.

Per garantire l'attendibilità dei valori di tensione ottenuti è stato fatto un confronto con il valore di forza elettromotrice che dovrebbe generare il generatore a magnete permanente in corrispondenza a $\omega_m = 143.31$ [rad/s] secondo il software FEMM; il valore di picco fornito dalla simulazione è risultato pari a:

$$E_{max} = 2p \cdot \omega_m \cdot \Lambda_c = 4 \cdot 143.31 \cdot 2.15 \cdot 10^{-2} = 12.32 \text{ [V]}$$

Il valore massimo della corrente che attraversa il carico dovrà quindi risultare pari a:

$$I_{RM} = \frac{E_{max}}{2 \cdot R_i + R} = \frac{12.32}{2 \cdot 6.3 + 5} = 0.7 \text{ [A]}$$

Il quale risulta davvero prossimo al valore di picco di corrente di carico ricavato dalla misura di tensione eseguita con oscilloscopio digitale.

Coppia in regime sinusoidale alla velocità massima

Si riporta nella sottostante figura i valori della coppia all' albero della microturbina misurati mediante torsionometro meccanico per una velocità di rotazione pari a 143.31 [rad/s].

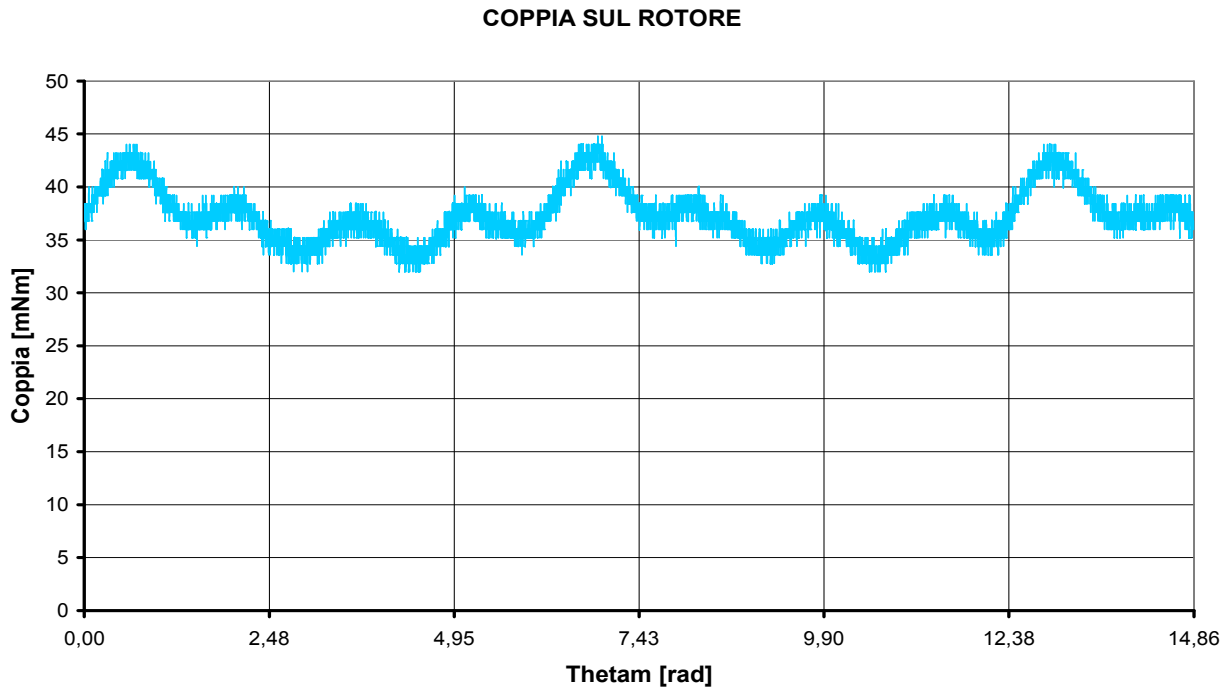


Fig. 5.27: Coppia all' albero per $\omega_m = 143.31$ [rad/s] in regime sinusoidale

Coppia netta in regime sinusoidale alla velocità massima

Come al solito, per determinare la coppia effettiva agente sul rotore del generatore a magnete permanente costruito è necessario sottrarre ai valori misurati i corrispondenti valori di offset misurati in assenza di carico meccanico alla massima velocità raggiungibile; la coppia al netto dell' offset così determinata viene riportata in funzione del tempo nella sottostante figura:

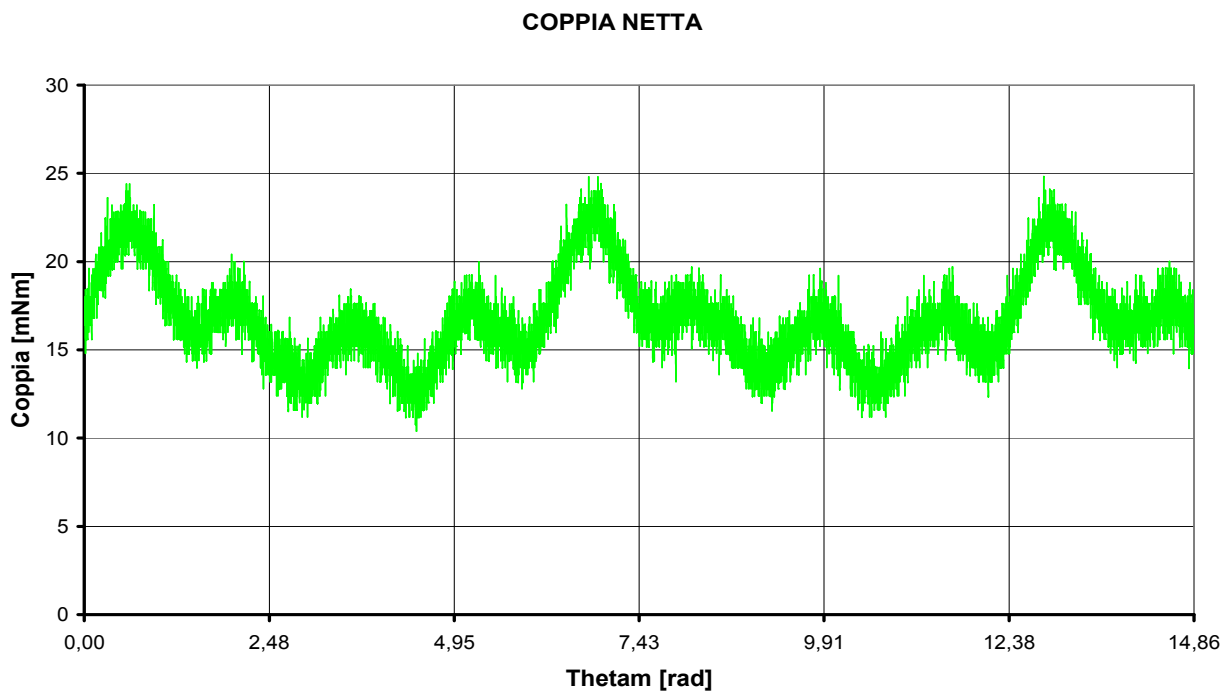


Fig. 5.28: Coppia al netto dell' offset per $\omega_m = 143.31$ [rad/s] in regime sinusoidale

Come si può osservare dalla precedente figura il valore medio di coppia all' albero in regime sinusoidale alla massima velocità di rotazione raggiungibile è risultato pari a:

$$T_m = 18.5 \quad [mNm]$$

Mentre la massima oscillazione di coppia ottenuta risulta essere pari a:

$$\Delta T = 13.1 \quad [mNm]$$

Valore notevolmente inferiore a quello ottenuto nel funzionamento a velocità minima.

Si riporta nella sottostante figura l' andamento grafico della coppia agente sul rotore nelle stesse condizioni di carico in regime sinusoidale ottenuto dalla simulazione mediante software FEMM, in modo tale da poter eseguire un confronto:

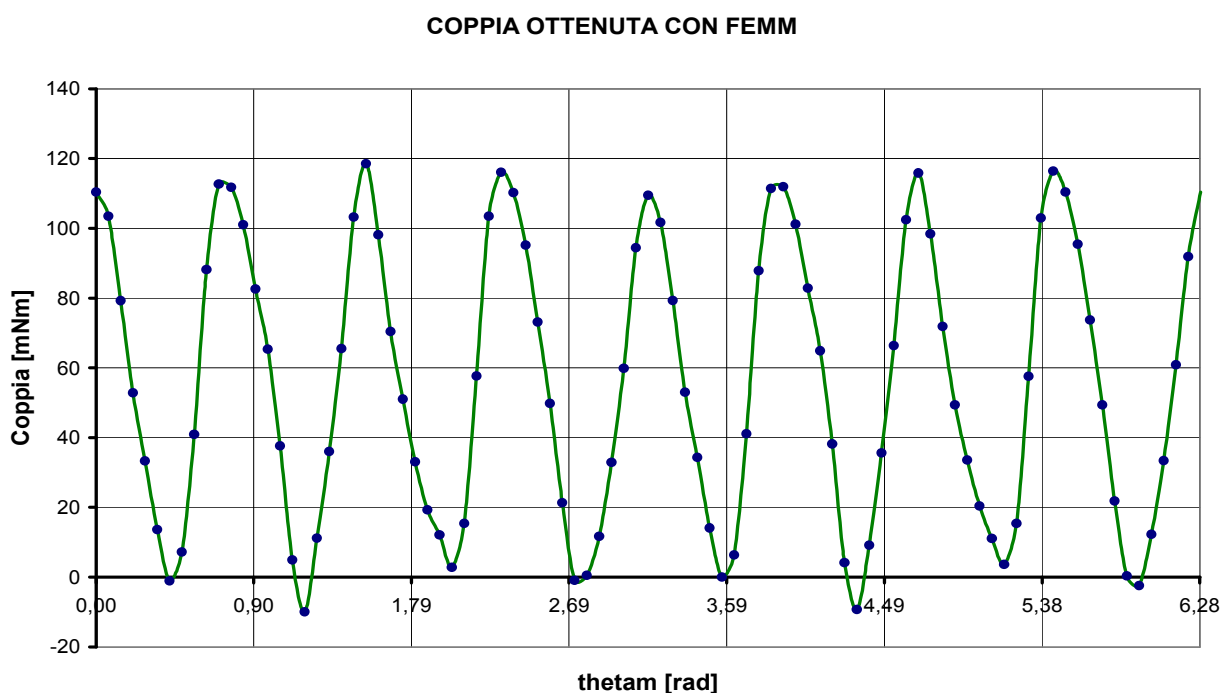


Fig. 5.29: Coppia simulata per $\omega_m = 143.31$ [rad/s] in regime sinusoidale

Osservando il grafico della coppia in funzione dell' angolo meccanico θ_m di Fig.2.29 si è riscontrato un valore medio della coppia corrispondente a:

$$T_m = 59 \quad [mNm]$$

Per quanto riguarda il massimo valore di oscillazione di coppia, esso è risultato pari a:

$$\Delta T = 130 \quad [mNm]$$

Confrontando i valori di T_m e ΔT misurati con quelli ottenuti mediante programma di simulazione si riscontra quasi un ordine di grandezza di differenza; inoltre la forma d' onda ottenuta dai valori di coppia misurati con il torsionmetro risulta molto meno oscillante rispetto al grafico della coppia ottenuto dalla simulazione.

Questo è dovuto alle forze d' inerzia delle parti meccaniche in movimento, le quali si aggiungono alla coppia motrice applicata dal motore DC contrastando le forze magnetiche generate dai magneti permanenti di statore.

Il programma di simulazione FEMM è in grado di stimare la coppia agente sul rotore della microturbina analizzando l' intensità e la conformazione dei campi B ed \vec{H} , ma non è in grado di stimare l' energia cinetica complessivamente messa in gioco dalle parti meccaniche in rotazione, pertanto la differenza riscontrata tra valori di coppia misurati e valori coppia simulati è del tutto giustificabile!

5.6 MISURA DI COPPIA IN REGIME CONTINUO

L'ultima categoria di misurazioni riguarda la misura della coppia agente all'albero della microturbina per diversi valori di velocità, quando quest'ultima è connessa ad un carico resistivo mediante convertitore AC/DC.

Il convertitore utilizzato è un raddrizzatore monofase a presa centrale, le cui caratteristiche sono già state analizzate nel capitolo precedente durante la fase di progettazione; si ritiene tuttavia opportuno riportarne lo schema di principio per fornire al lettore un veloce promemoria:

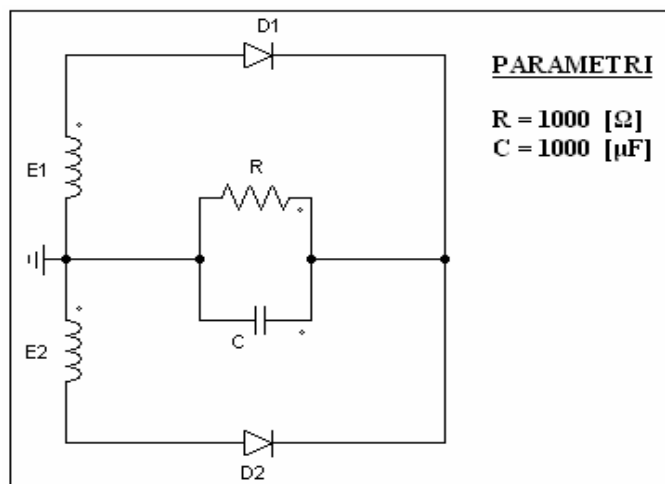


Fig. 5.30: Schema di principio del convertitore AC/DC

Il circuito montato per l'esecuzione della prova è molto simile ai precedenti, ovvero l'alimentatore stabilizzato alimenta il motore DC connesso all'albero del torsiometro meccanico, il quale a sua volta è connesso mediante giunto meccanico al rotore del generatore a magnete permanente costruito.

Il carico, costituito da una pura resistenza di valore nominale pari a $1000 \text{ } [\Omega]$, è alimentato dal generatore attraverso il raddrizzatore monofase a presa centrale realizzato, pertanto viene alimentato da una tensione continua (o comunque avente un valore di ripple praticamente trascurabile).

Nella sottostante figura viene riportata una foto raffigurante il circuito montato per l'esecuzione della misura di coppia con carico resistivo alimentato da tensione continua:

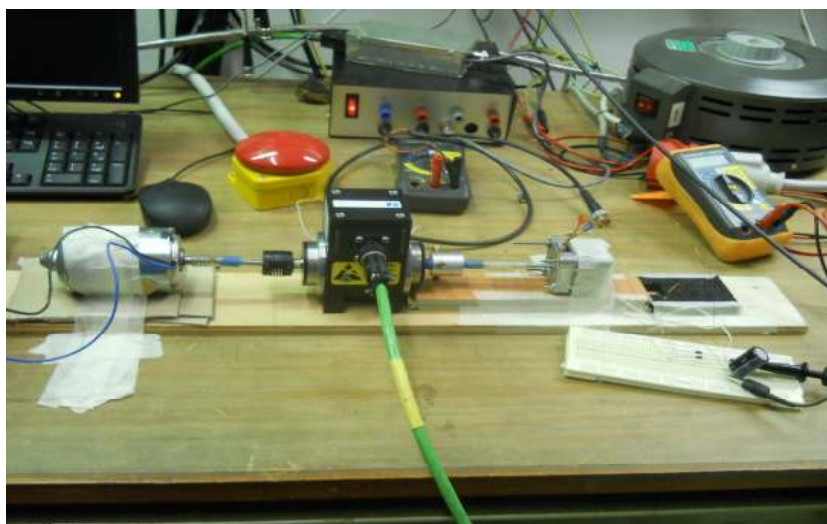


Fig. 5.31: Circuito impiegato per la misura di coppia in regime continuo

Tensione ai capi del carico alla velocità minima

Una volta montato il circuito di Fig.5.31 si è portato in rotazione il rotore del generatore a magnete permanente costruito alla velocità minima raggiungibile con il motore DC disponibile, corrispondente a $\omega_m = 18.54$ [rad/s].

Essendo in regime continuo non è stato possibile ricavare la velocità angolare meccanica dalla frequenza della tensione applicata al carico, pertanto la si è dovuta misurare mediante un tachimetro digitale portatile.

Si riporta qui di seguito la tensione in uscita dal raddrizzatore applicata al carico resistivo visualizzata con oscilloscopio digitale e rielaborata mediante foglio elettronico EXCEL:

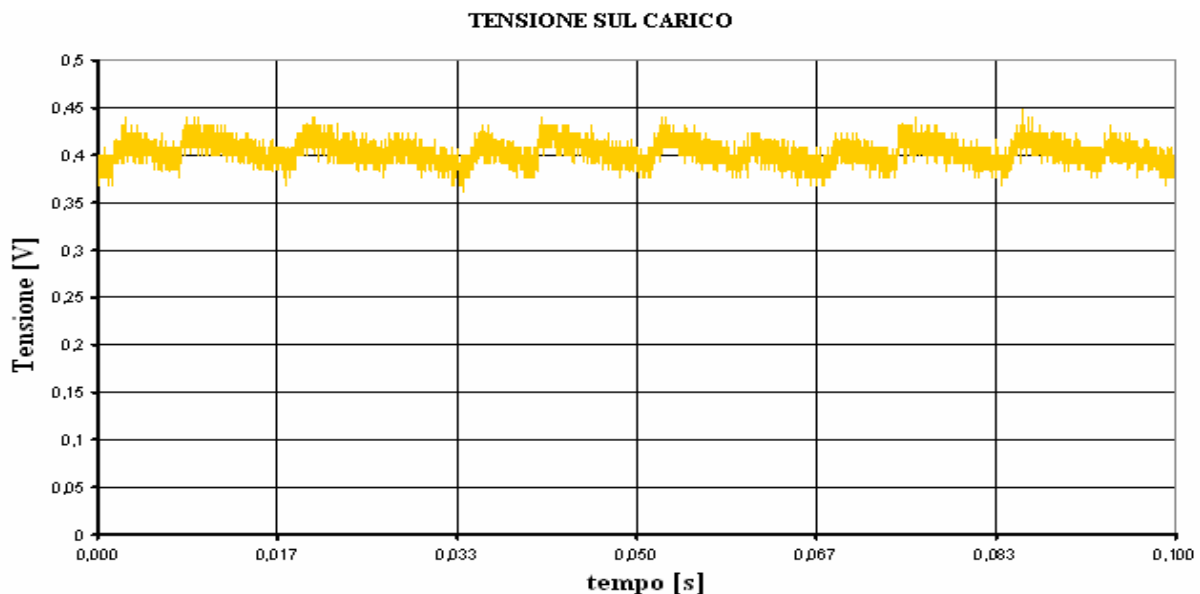


Fig. 5.32: Tensione applicata al carico per $\omega_m = 18.54$ [rad/s] in regime continuo

Coppia in regime continuo alla velocità minima

Si riporta nella seguente figura l'andamento grafico della coppia agente sul rotore della microturbina misurata con torsiometro meccanico; i valori di coppia convertiti in corrispondenti valori di tensione sono stati visualizzati mediante oscilloscopio digitale:

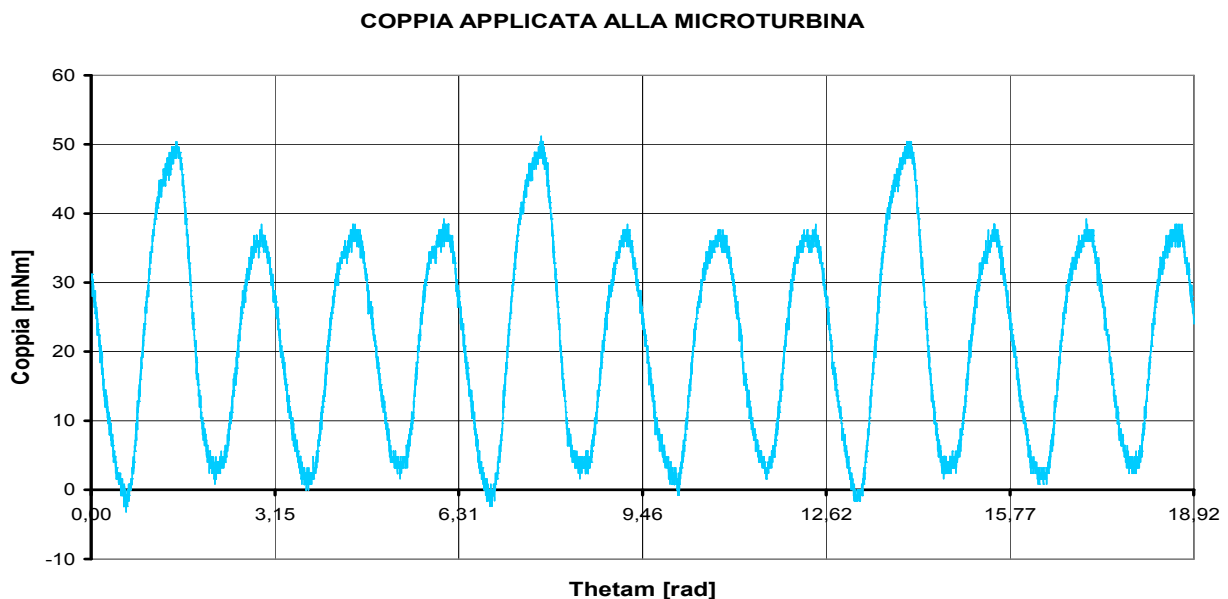


Fig. 5.33: Coppia misurata per $\omega_m = 18.54$ [rad/s] in regime continuo

Coppia netta in regime continuo alla velocità minima

I valori di coppia misurati sono falsati dalla presenza della coppia di offset rilevata dal torsionmetro in assenza di carico meccanico, pertanto sono stati corretti e rielaborati mediante foglio elettronico EXCEL; i valori di coppia al netto dell'offset vengono riportati nella sottostante figura:

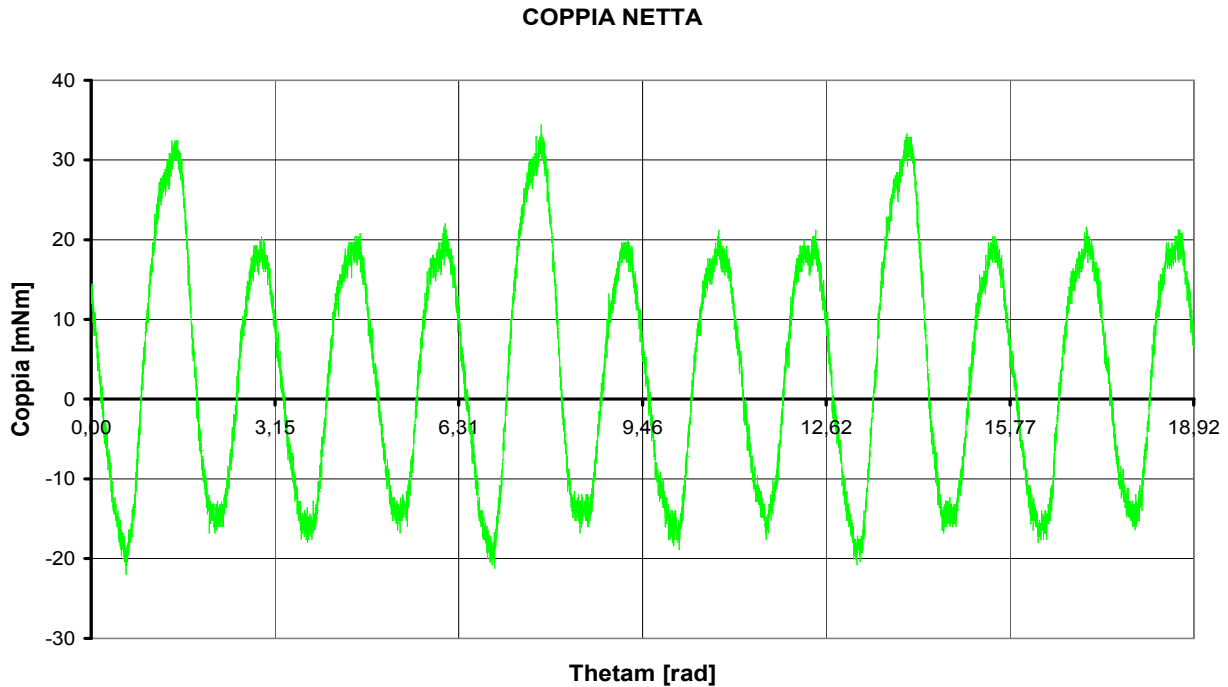


Fig. 5.34: Coppia al netto dell'offset per $\omega_m = 18.54$ [rad/s] in regime continuo

Il valore medio della coppia misurata nelle suddette condizioni di carico è risultata pari a:

$$T_m = 6 \quad [mNm]$$

Per quanto riguarda il massimo valore di oscillazione di coppia, esso è risultato pari a:

$$\Delta T = 55.2 \quad [mNm]$$

Per poter garantire l'attendibilità dei valori di coppia misurati è stato eseguito un confronto con i corrispondenti valori ottenuti mediante simulazione con software FEMM a regime continuo per $\omega_m = 18.54$ [rad/s]; dall'analisi del grafico della tensione sul carico precedentemente riportato in Fig.5.32 è stato ricavato un valore medio circa pari a:

$$V_{Rm} = 0.4 \quad [V]$$

Pertanto si è potuto stimare il valore medio della corrente che attraversa il carico resistivo mediante la seguente relazione:

$$I_R = \frac{V_{Rm}}{R} = \frac{0.4}{1000} = 0.4 \quad [mA]$$

In realtà l'andamento della corrente sugli avvolgimenti non è continuo ma a dente di sega, come si può constatare dalle simulazione sul convertitore eseguite con Power-Simulation nel precedente capitolo; tuttavia la bassissima intensità di corrente in gioco permette di definire durante il processo di analisi con il software FEMM una densità di corrente continua e omogenea sulla superficie occupata dagli avvolgimenti, senza riscontrare significative differenze.

Detto ciò si riporta nella sottostante figura l'andamento della coppia sul rotore ottenuta dalla simulazione in regime continuo alla velocità minima:

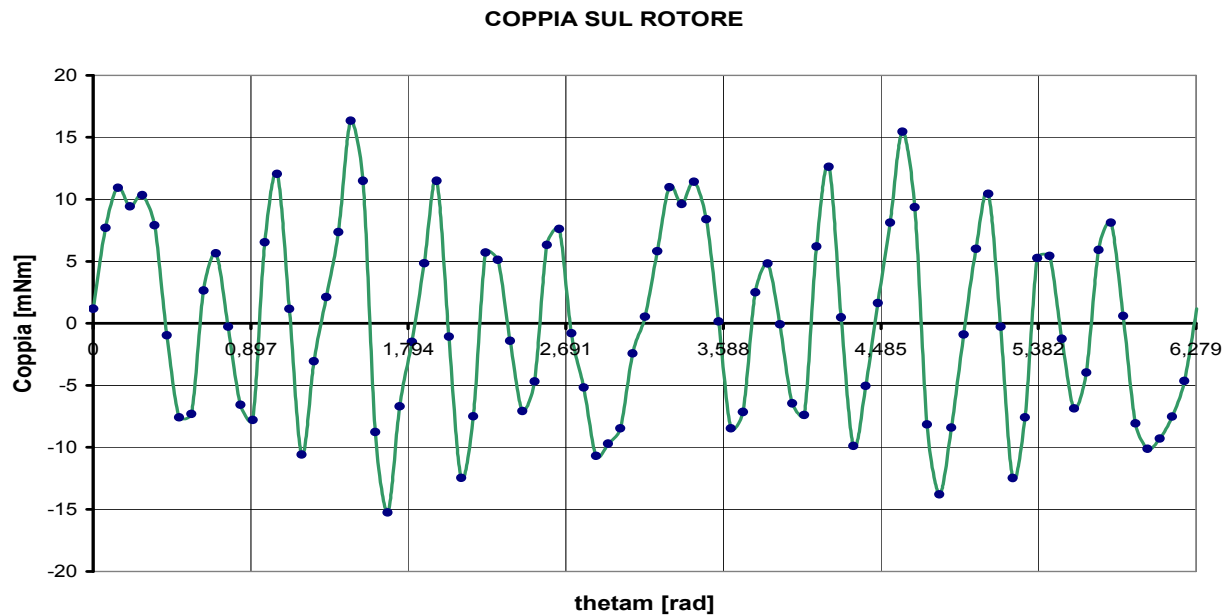


Fig. 5.35: Coppia ottenuta dalla simulazione per $\omega_m = 18.54$ [rad/s] in regime continuo

L' andamento grafico della coppia ottenuta è del tutto simile alla forma d' onda della coppia ottenuta dalla simulazione del generatore a magnete permanente funzionante a vuoto; questo risultato era del tutto prevedibile data la bassissima intensità delle correnti in gioco.

Il valore medio della coppia ottenuta dalla simulazione mediante software FEMM ricavato dalla precedente Fig.5.35 è risultato pari a:

$$T_m = 0.4 \quad [mNm]$$

Mentre il massimo valore di oscillazione di coppia ottenuto è risultato pari a:

$$\Delta T = 32.1 \quad [mNm]$$

Confrontando i valori di T_m e di ΔT misurati con i corrispondenti valori ottenuti dalla simulazione si può riscontrare una notevole somiglianza, pertanto i risultati ottenuti si possono considerare attendibili !

Tensione ai capi del carico alla velocità massima

Una volta effettuata la misurazione di coppia alla velocità minima si procede ora alla misurazione della coppia agente sul rotore del generatore a magnete permanente alla massima velocità raggiungibile ovvero $\omega_m = 151.31$ [rad/s].

Mantenendo sempre lo stesso circuito di alimentazione si porta al massimo la tensione in uscita dall'alimentatore stabilizzato, in modo tale da portare in rotazione al massimo della velocità l'albero del torsiometro ed il rotore della microturbina.

Nella seguente figura si può osservare l'andamento grafico della tensione in funzione del tempo visualizzata con oscilloscopio digitale:

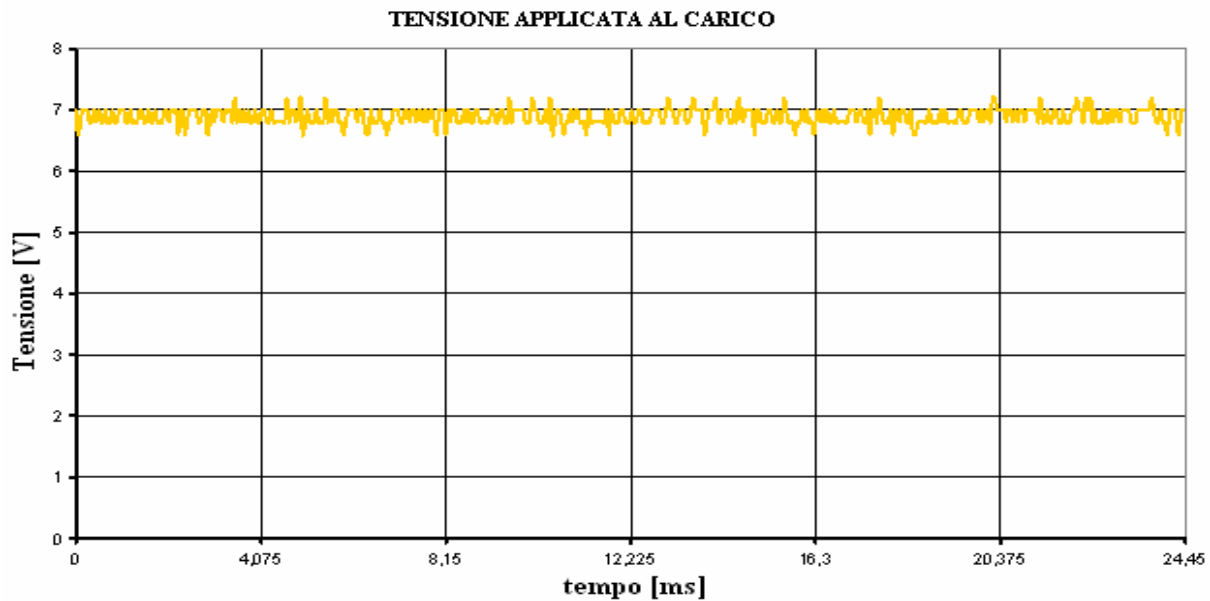


Fig. 5.36: Tensione ai capi del carico per $\omega_m = 151.31$ [rad/s] in regime continuo

Come si può notare osservando la precedente figura la tensione applicata al carico in uscita dal raddrizzatore presenta un ripple praticamente trascurabile, e pertanto si può ritenere continua; il valore medio determinato risulta essere pari a:

$$V_{Rm} = 6.8 \quad [V]$$

Come verifica è stata eseguita l'analisi del generatore a magnete permanente realizzato mediante programma di simulazione FEMM quando alimenta un carico di resistenza pari a $1000 \, [\Omega]$, il valore massimo della forza elettromotrice generata su ciascuna bobina, ovviamente di forma sinusoidale è risultato pari a:

$$E_{max} = 2p \cdot \omega_m \cdot \Lambda_c = 4 \cdot 151.31 \cdot 1.58 \cdot 10^{-2} = 9.58 \quad [V]$$

Il corrispondente valore efficace, considerando la forma d'onda sinusoidale, risulterà quindi:

$$E_{eff} = \frac{E_{max}}{\sqrt{2}} = \frac{9.58}{\sqrt{2}} = 6.76 \quad [V]$$

Collegando al generatore il raddrizzatore monofase a presa centrale realizzato si dovrebbe ottenere una tensione continua in uscita di valore pari al valore efficace della forza elettromotrice sinusoidale raddrizzata ossia:

$$V_R = E_{eff} = 6.76 \quad [V]$$

La quale risulta molto prossima al valore medio di tensione continua misurato ai capi del carico mediante oscilloscopio digitale.

Il corrispondente valore di corrente continua che attraversa il carico risulterà pertanto:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{6.8}{1000} = 6.8 \text{ [mA]}$$

Valore di molto inferiore alla corrente nominale del filo di rame di statore !

Coppia in regime continuo alla velocità massima

Si riporta nella seguente figura l'andamento grafico della coppia in funzione del tempo misurata con torsiometro meccanico alla velocità massima quando il generatore alimenta il carico resistivo da 1000 [Ω] mediante convertitore AC/DC:

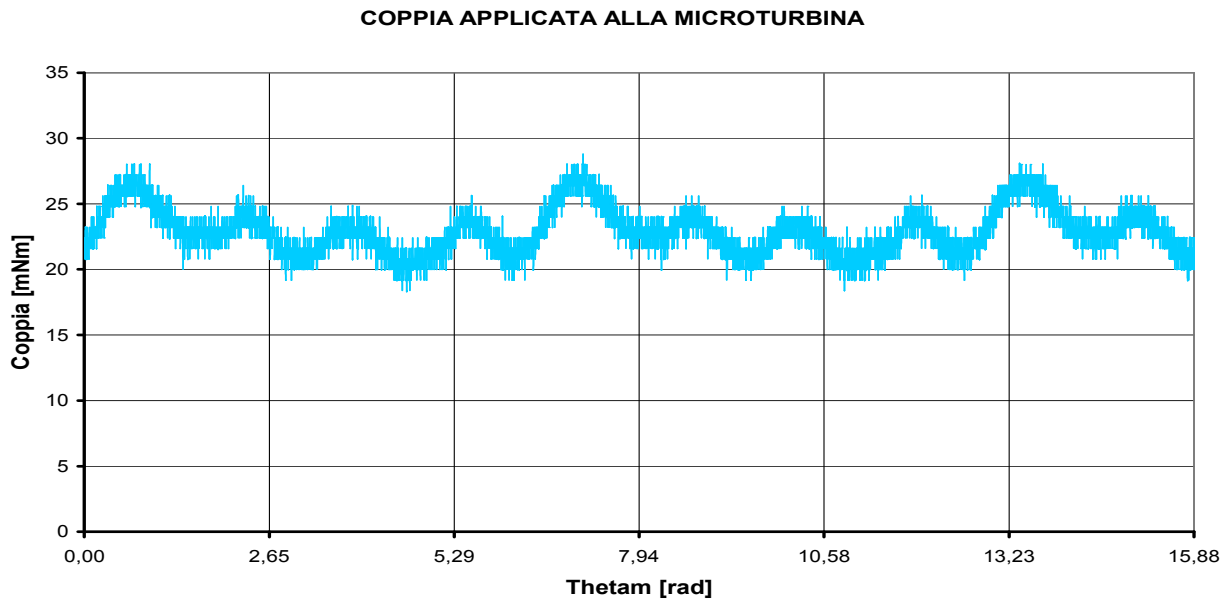


Fig. 5.37: Coppia misurata per $\omega_m = 151.31$ [rad/s] in regime continuo

Coppia netta in regime continuo alla velocità massima

Come al solito per ottenere i valori di coppia effettivamente presenti sul rotore è necessario detrarre la coppia di offset corrispondente alla massima velocità:

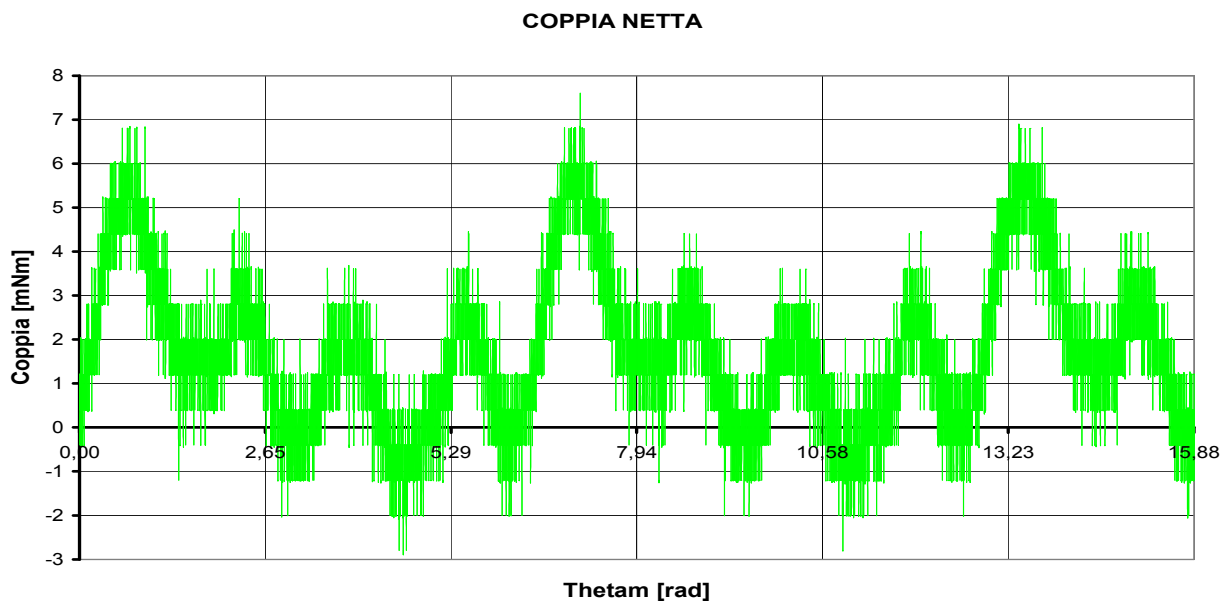


Fig. 5.38: Coppia netta ottenuta per $\omega_m = 151.31$ [rad/s] in regime continuo

La coppia al netto dell' offset riportata nella precedente Fig.5.37 presenta un valore medio pari a:

$$T_m = 2.5 \quad [mNm]$$

Mentre il massimo valore di oscillazione di coppia ottenuto è risultato pari a:

$$\Delta T = 9.41 \quad [mNm]$$

Per confronto si riporta qui di seguito la forma d' onda della coppia agente sul rotore ottenuta mediante simulazione con programma FEMM a regime continuo ipotizzando un valore di corrente negli avvolgimenti di statore pari a:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{6.8}{1000} = 6.8 \quad [mA]$$

É evidente che dato il valore molto basso di corrente in gioco i valori di coppia che si prevedono di ottenere risulteranno molto prossimi ai corrispondenti valori di coppia a vuoto.

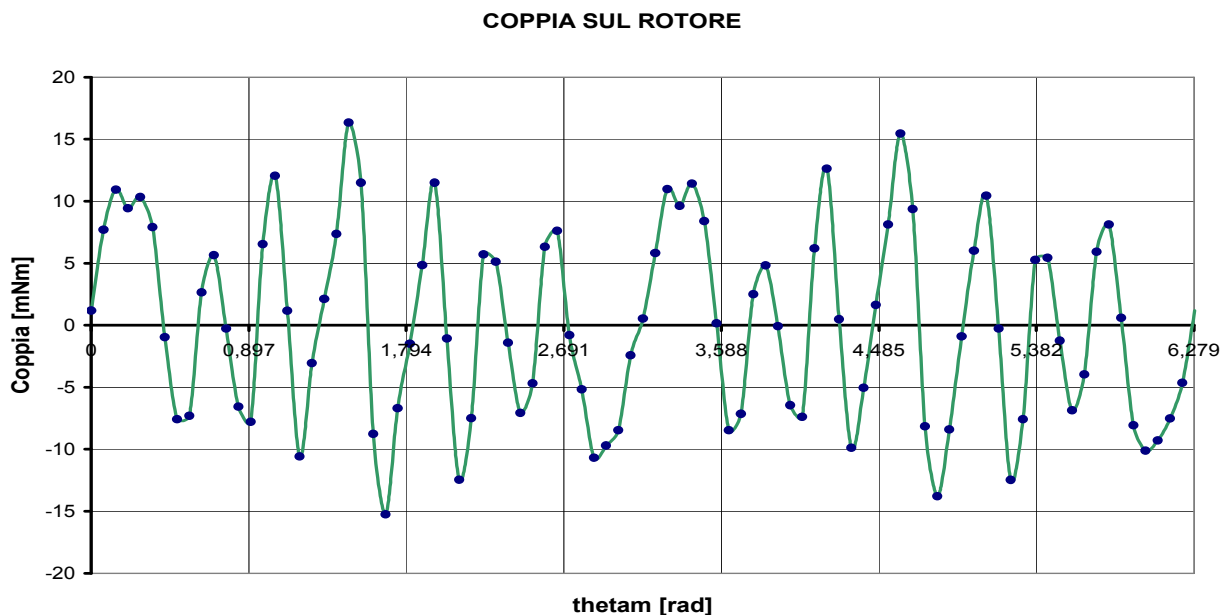


Fig. 5.39: Coppia ottenuta dalla simulazione per $\omega_m = 151.31 \text{ [rad/s]}$ in regime continuo

Il valore medio della coppia presente all' albero della microturbina ottenuto dall' analisi mediante programma di simulazione è risultato pari a:

$$T_m = 0.4 \quad [mNm]$$

Il massimo valore di oscillazione di coppia ottenuto dalla simulazione è risultato pari a:

$$\Delta T = 31.2 \quad [mNm]$$

I valori di T_m e ΔT ottenuti dalle simulazioni risultano maggiori di circa un ordine di grandezza rispetto ai corrispettivi valori misurati, anche la forma d' onda della coppia misurata presenta andamento molto meno oscillante rispetto al grafico della coppia ottenuto dall' analisi del generatore mediante software FEMM, ma questo è dovuto all' inerzia complessivamente messa in gioco dalle parti meccaniche in rotazione.

Dal confronto eseguito tra i valori misurati con apposita strumentazione sul generatore costruito ed i corrispondenti valori ottenuti dalle simulazioni mediante software FEMM è stata riscontrata una notevole somiglianza; si può dunque affermare che il lavoro di progettazione, analisi e realizzazione del prototipo ha dato esiti molto positivi !

Capitolo 6

STIMA DEI PARAMETRI ELETTROMECCANICI

Una volta eseguite le misure di tensione e di coppia sul generatore a magnete permanente realizzato si è proceduto alla stima dei parametri elettrici che costituiscono i dati di targa di un generatore ovvero:

- Forza elettromotrice a vuoto
- Corrente nominale
- Resistenza interna
- Induttanza degli avvolgimenti
- Rendimento

6.1 FORZA ELETTRMOTRICE GENERATA A VUOTO

La forza elettromotrice generata è proporzionale alla velocità angolare ω_m con la quale viene posto in rotazione il rotore del generatore, secondo la relazione:

$$E_0 = 2p \cdot \omega_m \cdot \Lambda_c \quad [V]$$

Anzichè dichiarare un valore specifico di forza elettromotrice generata a vuoto è più ragionevole in questo caso fornire all'operatore una curva rappresentante il valore efficace della tensione a vuoto in funzione della velocità di rotazione ω_m :

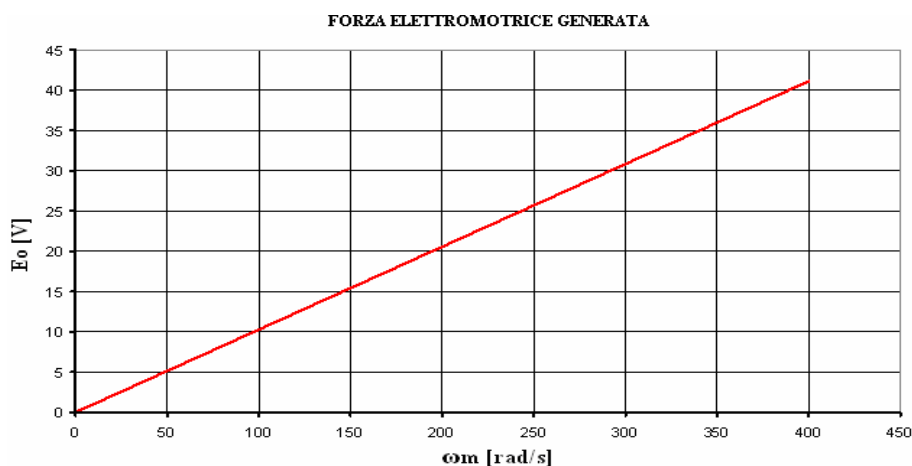


Fig. 6.1: Forza elettromotrice generata a vuoto in funzione di ω_m

I valori di tensione generati a vuoto in funzione della velocità angolare meccanica sono stati stimati mediante simulazione attraverso il programma FEMM, e successivamente misurati mediante multimetro elettronico per conferma.

6.2 CORRENTE NOMINALE

La corrente nominale viene definita come il valore massimo di corrente ammissibile che può circolare per un tempo teoricamente infinito negli avvolgimenti di statore senza superare il massimo valore di temperatura ammissibile.

La scelta più ragionevole è sembrata quella di porre come valore di corrente nominale del generatore la corrente nominale caratteristica del filo di rame con il quale sono stati realizzati gli avvolgimenti della macchina, ovvero:

$$I_n = 500 \quad [mA]$$

In caso di funzionamento in regime sinusoidale, il valore di I_n si dovrà riferire al valore efficace della corrente alternata che attraversa il carico.

6.3 RESISTENZA DEGLI AVVOLGIMENTI

Un parametro di notevole importanza che è stato ritenuto opportuno dichiarare è la resistenza interna di ciascuno dei due avvolgimenti di statore della microturbina.

Valore di resistenza misurato

La resistenza elettrica di ciascuna delle bobine di rame costruite è stata misurata mediante multimetro elettronico ad una temperatura ambiente di circa 26 [°C], il valore ottenuto è risultato pari a:

$$R_{avv} = 6.3 \quad [\Omega]$$

La resistenza elettrica misurata è risultata esattamente la stessa per entrambi gli avvolgimenti, questo era del tutto prevedibile dato che sono stati costruiti con lo stesso filo di rame, con lo stesso numero di spire e risultano esattamente della stessa lunghezza.

Valore di resistenza calcolato analiticamente

Al fine di garantire la correttezza del valore misurato si è proceduto ad una stima della resistenza degli avvolgimenti mediante calcolo analitico; per prima cosa è stato assegnato un opportuno valore di resistività al filo di rame utilizzato, ovvero:

$$\rho = 0.0165 \quad \left[\frac{\Omega \cdot mm^2}{m} \right]$$

Tale valore fa riferimento al rame elettrolitico ad una temperatura ambiente di circa 20 [°C].

Il passo successivo è stato quello di calcolare la sezione del filo di rame usato per costruire gli avvolgimenti del generatore a magnete permanente conoscendone il diametro, il cui valore dichiarato dal costruttore è pari a:

$$d = 0.25 \quad [mm]$$

La corrispondente sezione è stata stimata mediante la nota relazione:

$$S = \frac{\pi}{4} \cdot d^2 = \frac{\pi}{4} \cdot 0.25^2 = 0.0491 \quad [mm^2]$$

Calcolata la sezione è necessario stimare la lunghezza del filo con il quale sono state realizzate ciascuna delle due bobine che costituiscono gli avvolgimenti di statore, per fare questo si faccia

riferimento alla seguente Fig.6.2 nella quale viene rappresentato in modo schematico ciascuno dei due avvolgimenti di statore:

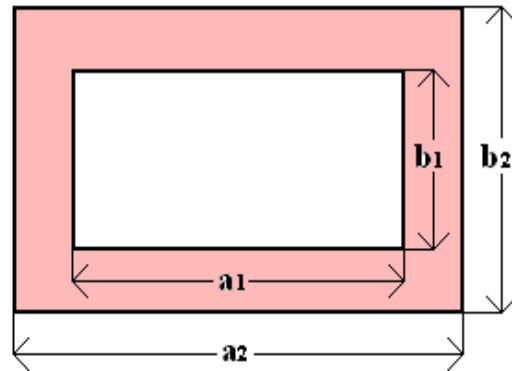


Fig. 6.2: Rappresentazione schematica dell' avvolgimento di statore

Le dimensioni dell' avvolgimento misurate in modo approssimativo mediante riga millimetrata sono risultate rispettivamente pari a:

$$a_1 = 23 \quad [mm] \quad b_1 = 16 \quad [mm]$$

$$a_2 = 30 \quad [mm] \quad b_2 = 24 \quad [mm]$$

Grazie alle quali è stato possibile stimare la lunghezza della spira media applicando la seguente espressione:

$$\ell_m = \frac{2 \cdot (a_1 + b_1) + 2 \cdot (a_2 + b_2)}{2} = \frac{2 \cdot (23 + 16) + 2 \cdot (30 + 24)}{2} = 93 \quad [mm]$$

La lunghezza complessiva di ciascuno dei due avvolgimenti di statore risulterà quindi pari a:

$$\ell_{avv} = n_c \cdot \ell_m + 2 \cdot \ell_t = (200 \cdot 93 + 2 \cdot 300) \cdot 10^{-3} = 19.2 \quad [m]$$

Nella quale ℓ_t rappresenta la lunghezza di ciascuno dei due terminali della bobina costituente l' avvolgimento di statore, mentre la corrispondente resistenza elettrica dovrà infine essere pari a:

$$R_{avv} = \rho \cdot \frac{\ell_{avv}}{S} = 0.0165 \cdot \frac{19.2}{0.0491} = 6.45 \quad [\Omega]$$

Il quale si avvicina abbastanza al valore di resistenza misurato mediante multimetro elettronico.

6.4 INDUTTANZA DEGLI AVVOLGIMENTI

L' induttanza degli avvolgimenti di statore è già stata stimata nel capitolo 4 durante la progettazione del raddrizzatore monofase a presa centrale, tuttavia è stato ritenuto opportuno riportare una breve descrizione del procedimento di calcolo e di misura adottato al fine di ottenerne una stima:

- Misura della tensione a vuoto

Mediante il solito motore DC a magnete permanente è stato portato in rotazione il rotore del generatore a magnete permanente costruito, fino a raggiungere una velocità di rotazione pari a $\omega_m = 51$ [rad/s]; dopodichè è stata rilevata la forma d' onda della forza elettromotrice generata su ciascuno degli avvolgimenti di statore mediante oscilloscopio digitale.

Al fine di stimare il valore efficace della tensione rilevata è stata eseguita la scomposizione in serie di fourier in modo da determinare l' ampiezza dell' armonica fondamentale, il cui valore efficace è risultato pari a:

$$V_{0eff} = 1.564 \quad [V]$$

- Misura della corrente di cortocircuito

Una volta stimato il valore efficace della tensione generata a vuoto a velocità ridotta si è proceduto alla misurazione della corrente di cortocircuito mediante multimetro elettronico in modalità amperometro, sempre per una velocità angolare di rotazione di $\omega_m = 51$ [rad/s]; essa è risultata pari a:

$$I_c = 0.172 \quad [A]$$

- Calcolo della reattanza induttiva

Grazie alle misure eseguite è stato possibile ricavare il modulo dell' impedenza complessiva dell' avvolgimento di statore, risultato pari a:

$$Z = \frac{V_{0eff}}{I_c} = \frac{1.564}{0.172} = 9.093 \quad [\Omega]$$

La reattanza induttiva dell' avvolgimento di statore è dunque risultata pari a:

$$X = \sqrt{Z^2 - R^2} = \sqrt{9.093^2 - 6.3^2} = 6.557 \quad [\Omega]$$

Pertanto l' induttanza di ciascuno dei due avvolgimenti di statore (se così si può chiamare) è risultata pari a:

$$L = \frac{X}{2p \cdot \omega_m} = \frac{6.557}{4 \cdot 51} = 32.14 \quad [mH]$$

- Misura mediante LCR-METER

L' induttanza degli avvolgimenti di statore è stata inoltre misurata mediante lo strumento elettronico denominato LCR-METER, presente nel laboratorio di Azionamenti Elettrici, il valore ottenuto è risultato pari a:

$$L = 31.2 \quad [mH]$$

Valore molto prossimo a quello stimato analiticamente attraverso la misura di tensione e corrente a frequenza ridotta !

6.5 PERDITE NEL RAME

Le perdite di potenza per effetto joule negli avvolgimenti di statore dipendono dall' intensità della corrente che circola in essi, pertanto per poterle stimare è necessario considerare una ben precisa condizione di lavoro.

Si è quindi stabilito che il generatore a magnete permanente funziona nelle condizioni di lavoro nominali quando alimenta un carico tale da far circolare negli avvolgimenti di statore una corrente sinusoidale il cui valore efficace sia pari alla corrente nominale I_n .

In tal caso la potenza termica dissipata per effetto joule negli avvolgimenti di statore risulta pari a:

$$P_{jN} = 2 \cdot R_{avv} \cdot I_n^2 = 2 \cdot 6.3 \cdot 0.5^2 = 3.15 \quad [W]$$

Nella quale R_{avv} rappresenta la resistenza di ciascuno degli avvolgimenti di statore misurata con multimetro elettronico, mentre I_n è il valore nominale di corrente del filo di rame utilizzato per realizzarli dichiarato dal costruttore.

Nel caso in cui il generatore alimenti un carico resistivo generico in regime sinusoidale il valore efficace della corrente circolante negli avvolgimenti I_{eff} risulterà diverso dal valore nominale I_n , pertanto le perdite joule risulteranno pari a:

$$P_j = 2 \cdot R_{avv} \cdot I_{eff}^2$$

Per avere una stima immediata della potenza dissipata per effetto joule nel rame del generatore a magnete permanente è stata tracciata la curva delle perdite nel rame in funzione del valore efficace della corrente sinusoidale erogata:

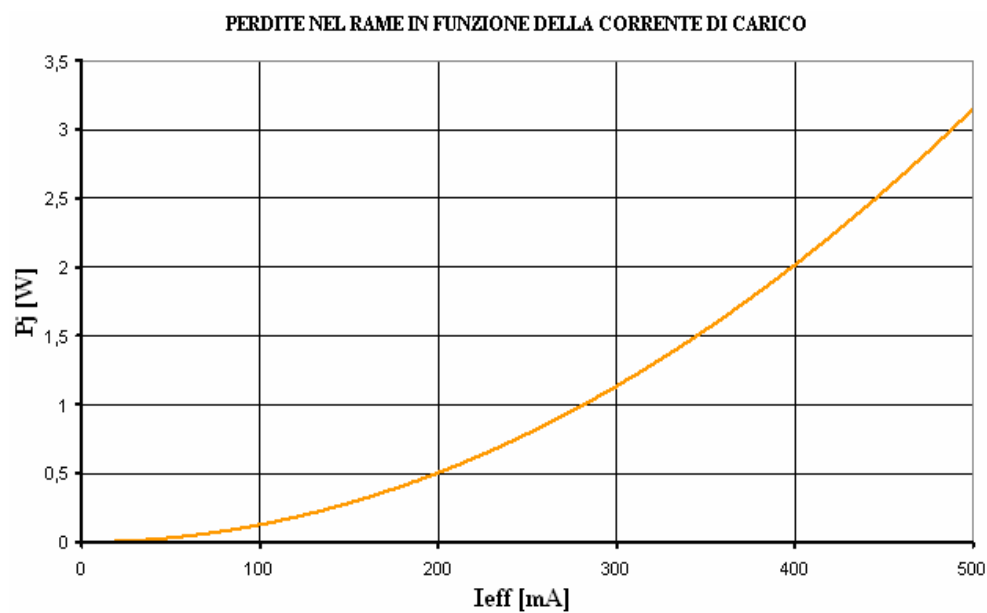


Fig. 6.3: Perdite nel rame in funzione della corrente erogata

6.6 PERDITE NEL FERRO

Le perdite nel ferro sono state stimate con due diversi metodi: il primo mediante l'analisi del campo di induzione magnetica nella corona di statore mediante simulazioni con software FEMM, il secondo mediante la misura della tensione indotta in un avvolgimento ausiliario inserito nella corona di statore del generatore realizzato; entrambi i metodi vengono qui di seguito descritti dettagliatamente.

Stima mediante simulazione con FEMM

Per applicare questo metodo si è dovuto innanzitutto eseguire una serie di simulazioni per determinare il valore del campo di induzione magnetica B a vuoto presente in un dato punto della corona di statore per diverse posizioni del rotore.

Nella figura sottostante viene messo in risalto il punto P nel quale è stato stimato il valore di campo d'induzione magnetica per diversi valori dell'angolo meccanico θ_m :

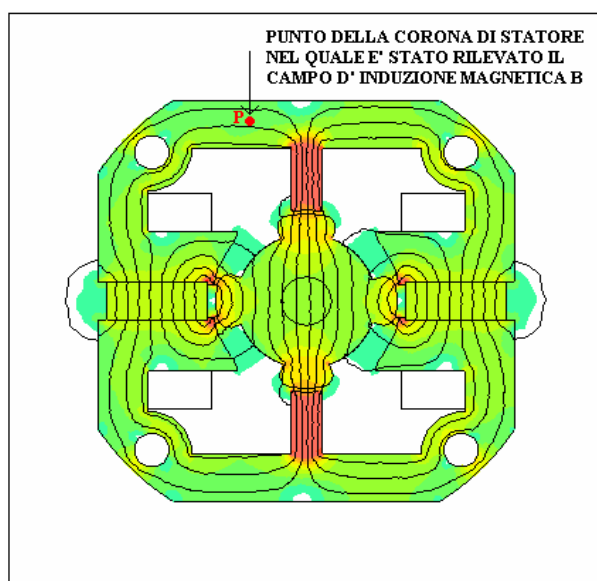


Fig. 6.4: Punto dello statore scelto per l'analisi del campo \vec{B}

Al fine di eseguire una serie di simulazioni in successione mediante software FEMM per diverse posizioni del rotore è stato realizzato uno script in codice LUA, il quale viene qui di seguito riportato:

PRECAMPO.LUA

```
-- INDUZIONE MAGNETICA IN UN PUNTO DELLA CORONA

handle=openfile("Induzione.txt","a")
write(handle,
"B[wb]","\n")
closefile(handle)

handle=openfile("Thetam.txt","a")
write(handle,
"Thetam [rad]","\n")
closefile(handle)

-- INTRODUZIONE DEI DATI INIZIALI

p=2
thetamin=0
thetamax=90
step=1
J=0 -- [A/mm2]
Scu1=51.6 -- [mm2]
Imax=J*Scu1 -- [A]

for thetam=thetamin,thetamax,step do

    Ib=-Imax*cos(2*p*thetam)
    openfemmfile("modello0.fem")
    selectgroup(10)
    moverotate(0,0,thetam)
    clearselected()
    modifycircprop("Icu1",1,Ib)
    modifycircprop("Icu2",1,-Ib)
    savefemmfile("temp.fem")
    createmesh()
    analyse()
    thetarad=thetam*3.1416/180
    handle=openfile("Thetam.txt","a")
    write(handle,
    thetarad,"\n")
    closefile(handle)
    runpost("POSTB.lua")

end
```

POSTCAMPO.LUA

```
-- CALCOLO DELL' INTEGRALE DI VOLUME DI B

groupselectblock(99)
IntBx=blockintegral(8)
IntBy=blockintegral(9)
volume=blockintegral(10)
clearblock()
IntB=sqrt(IntBx^2+IntBy^2)
B=IntB/volume

-- SCRIVI IL VALORE DI B NEL FILE Induzione.txt

handle=openfile("Induzione.txt","a")
write(handle,
B,"\n")
closefile(handle)

exitpost()
```

Grazie allo script in codice LUA è stato possibile realizzare il grafico del modulo del campo \dot{B} per diversi valori dell'angolo meccanico θ_m nel punto P della corona di statore, il quale viene riportato nella sottostante figura:

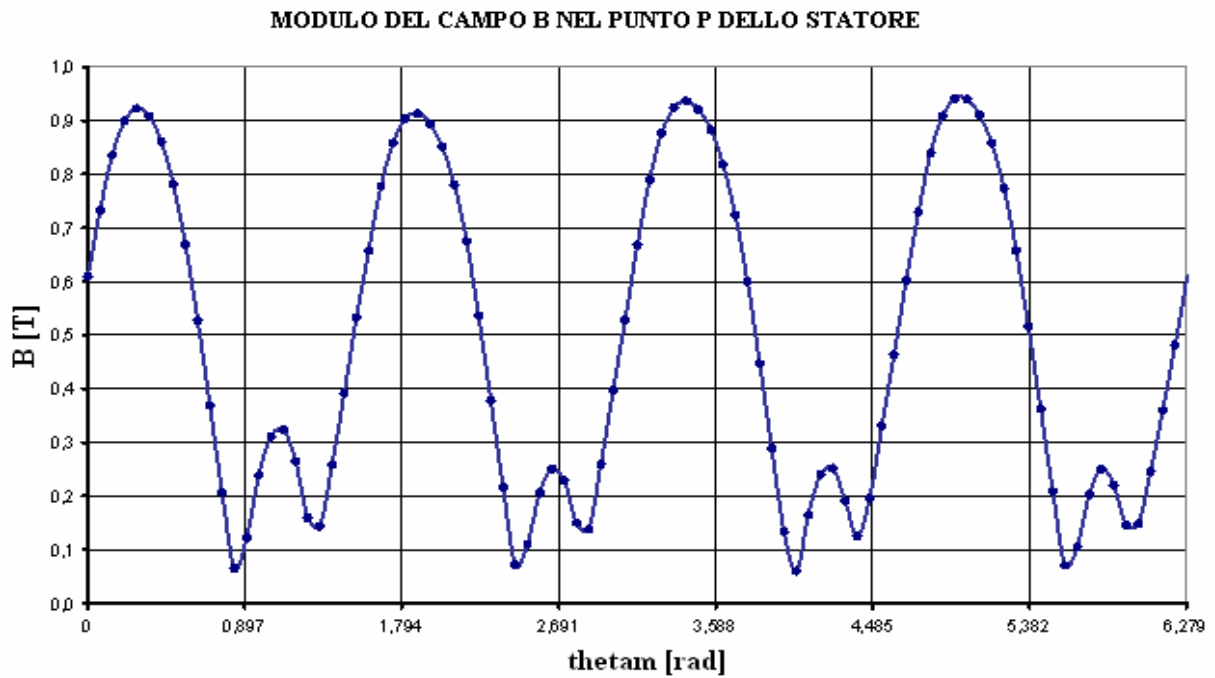


Fig. 6.5: Analisi del campo d' induzione magnetica \dot{B} nel punto P

Dopo aver tracciato l' andamento grafico del modulo del campo \dot{B} in funzione della posizione angolare del rotore è stata effettuata la scomposizione in serie di Fourier al fine di determinare l' ampiezza delle singole armoniche; nella sottostante Fig.6.6 viene riportato lo sviluppo in serie di Fourier ottenuto mediante il solito script in codice MATLAB descritto nei precedenti capitoli:

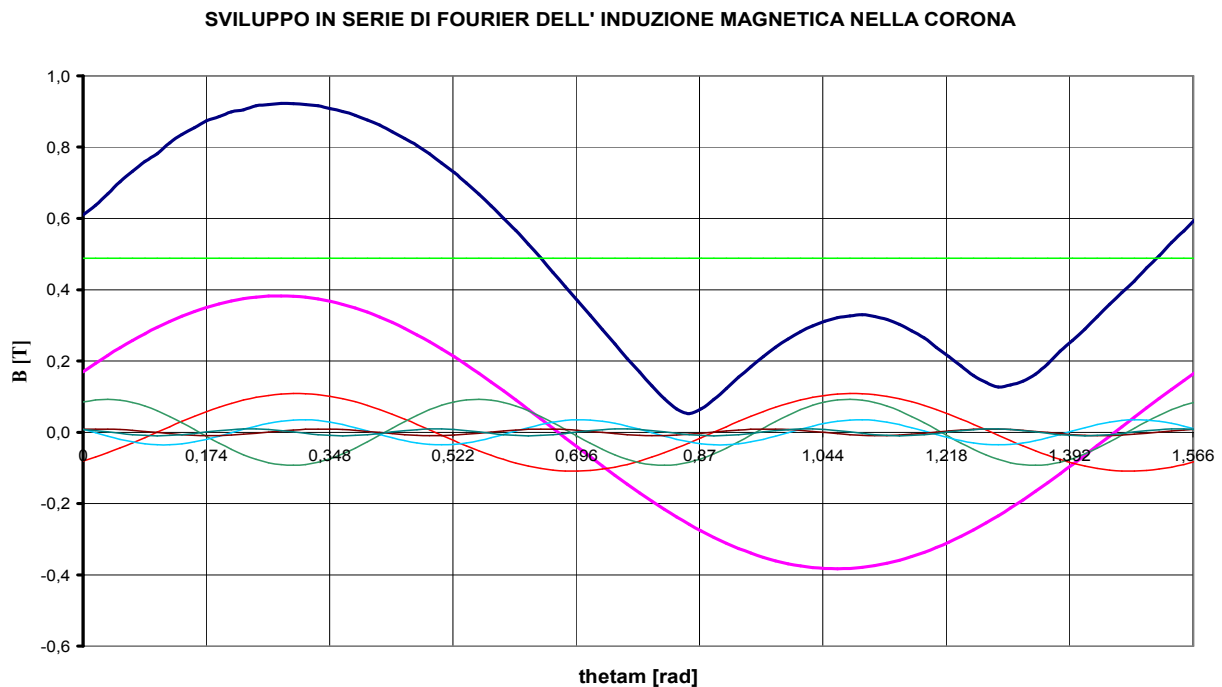


Fig. 6.6: Sviluppo in serie di Fourier di $|\dot{B}|$ in funzione di θ_m

Una volta scomposta la forma d'onda del campo d'induzione magnetica in più sinusoidi a frequenza multipla della fondamentale è stato possibile determinare ampiezza e fase di ciascuna delle armoniche ottenute; i risultati forniti dallo script in codice MATLAB sono stati raccolti nella sottostante tabella:

Tabella 6.1: Valore efficace e fase delle singole armoniche

ARMONICA	ak [T]	bk [T]	Beffk [T]	Bmax [T]	Phase [rad]	f [Hz]
1	0,1698	0,3430	0,2706	0,3827	-1,111	108,225
2	-0,0806	0,0734	0,0771	0,1090	0,738	216,450
3	0	0,0360	0,0654	0,0925	-0,399	324,675
4	0,0085	-0,0340	0,0248	0,0351	1,325	432,900
5	0,0085	0,0042	0,0007	0,0009	-0,461	541,125
6	0,0080	-0,0056	0,0069	0,0098	0,610	649,350

Conoscendo il valore massimo di ciascuna delle armoniche che compongono la forma d'onda del campo \vec{B} è stato possibile calcolare con la formula di **Steinmetz** la perdita specifica che ognuna di esse comporta nel circuito ferromagnetico del generatore a magnete permanente, supponendo che in tutti i punti dello statore l'andamento del campo d'induzione magnetica si comporti come al punto P.

Le perdite nel ferro specifiche sono state quindi stimate per ciascuna delle armoniche mediante la seguente relazione:

$$P_{FEk} = K_{ist} \cdot B_k^\alpha \cdot \left(\frac{f_k}{50}\right) + K_{cp} \cdot B_k^2 \cdot \left(\frac{f_k}{50}\right)^2 \quad (6.1)$$

Nella quale $K_{ist} = 1.61$ rappresenta il coefficiente di isteresi, $K_{cp} = 0.69$ è il coefficiente rappresentativo delle perdite per correnti parassite ed infine α rappresenta l'esponente che lega le perdite specifiche dovute al fenomeno di isteresi magnetica al valore efficace del campo B; in questo caso è stato posto pari a 2 ! Nella seguente tabella vengono dunque riportate le perdite nel ferro specifiche per ognuna delle componenti armoniche nelle quali è stato scomposto il campo d'induzione magnetica B:

Tabella 6.2: Perdite nel ferro specifiche generate dalle singole armoniche

ARMONICA	ak [T]	bk [T]	Beffk [T]	Bmax [T]	Phase [rad]	f [Hz]	PFe [W/Kg]
1	0,1698	0,3430	0,2706	0,3827	-1,111	108,225	0,9838
2	-0,0806	0,0734	0,0771	0,1090	0,738	216,450	0,2366
3	0	0,0360	0,0654	0,0925	-0,399	324,675	0,3383
4	0,0085	-0,0340	0,0248	0,0351	1,325	432,900	0,0808
5	0,0085	0,0042	0,0007	0,0009	-0,461	541,125	0,0001
6	0,0080	-0,0056	0,0069	0,0098	0,610	649,350	0,0131

Le perdite nel ferro specifiche complessivamente messe in gioco sono state in seguito calcolate come somma dei contributi generati da ciascuna delle componenti armoniche:

$$P_{FE} = \sum_{k=1}^n P_{FEk} = 1.653 \quad [W/Kg]$$

Al fine di stimare le perdite totali dovute all'isteresi magnetica e alla presenza di correnti parassite sono stati pesati sia il nucleo ferromagnetico di statore sia il rotore mediante bilancia elettronica la cui sensibilità è pari a 2 grammi.

Le misure del peso dello statore e del rotore forniti dalla bilancia elettronica sono risultati rispettivamente pari a:

$$G_{st} = 0.126 \pm 0.002 \quad [Kg]$$

$$G_{rt} = 0.03 \pm 0.002 \quad [Kg]$$

Supponendo che l' intensità del campo d' induzione magnetica B nel rotore sia circa uguale a quella determinata nel punto P dello statore le perdite specifiche si possono ritenere uguali, pertanto sulla base di queste ipotesi le perdite totali nel ferro sono risultate pari a:

$$P_{FEt} = P_{FE} \cdot (G_{st} + G_{rt}) = 1.653 \cdot (0.126 + 0.03) = 0.258 \quad [W]$$

Stima mediante misurazione della tensione

Per applicare questo metodo di stima delle perdite nel ferro è stato introdotto un piccolo avvolgimento composto da 10 spire nella corona di statore, al fine di rilevarne la tensione indotta su di esso mediante oscilloscopio digitale per una velocità di rotazione di circa 170 [rad/s].

Nella sottostante figura viene riportata una foto raffigurante la bobina ausiliaria introdotta nel generatore per stimare le perdite nel ferro:

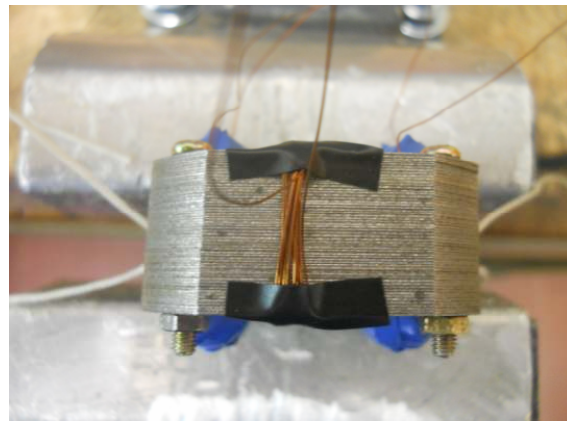


Fig. 6.7: Bobina ausiliaria per la stima delle perdite nel ferro

Si riporta il grafico della tensione indotta nell' avvolgimento ausiliario rilevata mediante oscilloscopio digitale e successivamente rielaborata mediante foglio elettronico EXCEL:

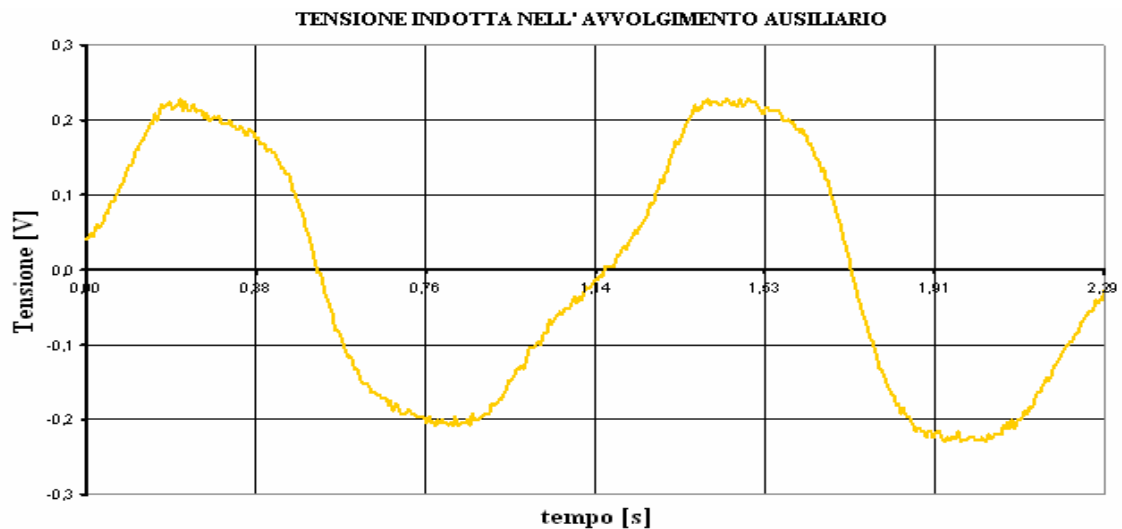


Fig. 6.8: Tensione indotta sulla bobina ausiliaria per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Dalla conoscenza della forza elettromotrice indotta è stato possibile ricavare i corrispondenti valori del flusso concatenato con la bobina ausiliaria introdotta nello statore mediante la relazione:

$$\Lambda_c(t) = \int_T e(t) dt$$

L' integrale della forza elettromotrice $e(t)$ è stato realizzato mediante uno script in codice MATLAB del tutto simile a quello utilizzato per il calcolo dei coefficienti delle armoniche mediante le quali è stata eseguita la scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato, la forma d' onda ottenuta in funzione del tempo viene riportata nella figura sottostante:

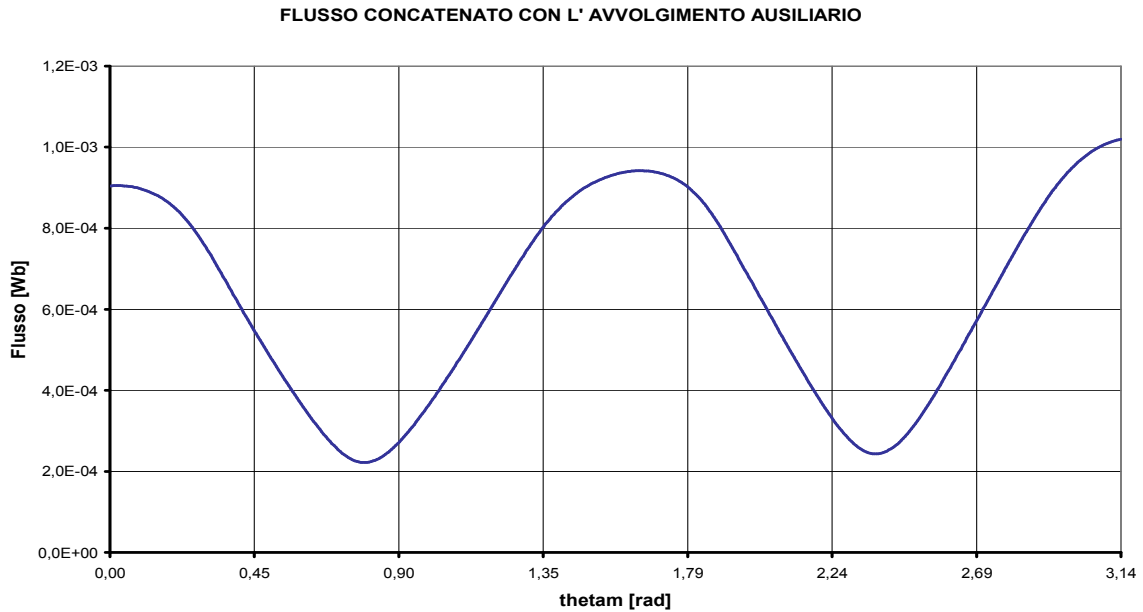


Fig. 6.9: Flusso concatenato con la bobina ausiliaria di statore per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Dopo aver determinato il grafico del flusso concatenato in funzione del tempo si è proceduto a ricavare i corrispondenti valori del campo di induzione magnetica B nella corona di statore, il cui grafico è stato riportato nella figura sottostante:

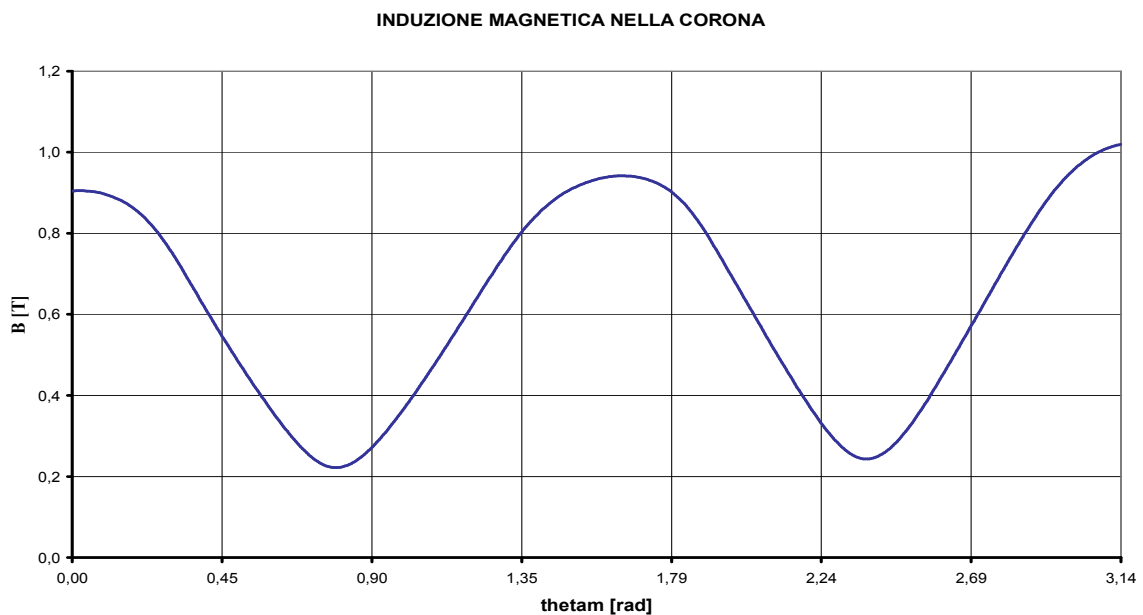


Fig. 6.10: Campo d' induzione magnetica ricavato mediante la relazione (6.2)

I valori del campo B sono stati ricavati dai corrispondenti valori del flusso concatenato con la bobina ausiliaria introdotta nello statore mediante la semplice relazione:

$$B(t) = \frac{\Lambda_c(t)}{N_{sp} \cdot S} \quad (6.2)$$

Nella quale N_{sp} rappresenta il numero di spire dell' avvolgimento di statore ed S rappresenta la sezione della corona di statore.

Dopodichè è stata eseguita la scomposizione in serie di Fourier del campo di induzione magnetica ottenuto dalla rielaborazione della forza elettromotrice misurata, il cui grafico viene riportato nella figura sottostante:

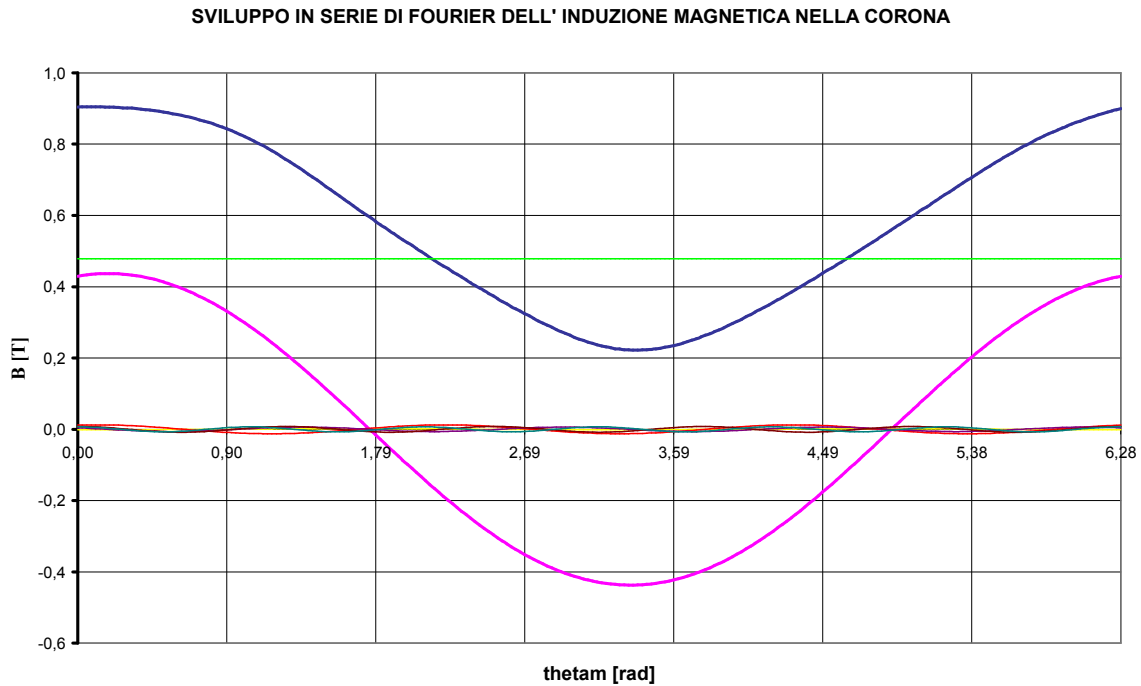


Fig. 6.11: Sviluppo in serie di Fourier del campo B nella corona di statore

Lo script in codice MATLAB che ha scomposto in serie di fourier la forma d' onda del campo d' induzione magnetica ha fornito inoltre i valori di ampiezza e fase delle armoniche principali ottenute, i quali sono stati raccolti nella seguente tabella:

Tabella 6.3: Ampiezza delle armoniche del campo B nella corona

ARMONICA	ak [T]	bk [T]	Beffk [T]	Bmax [T]	Phase [rad]	f [Hz]
1	0,4294	0,0811	0,3399	0,4807	-0,241	108,225
2	-0,0013	-0,0003	0,0009	0,0013	-0,224	216,450
3	0,0118	0,0043	0,0089	0,0126	-0,353	324,675
4	0,0042	-0,0048	0,0045	0,0064	0,853	432,900
5	0,0081	-0,0001	0,0057	0,0081	0,017	541,125
6	0,007	-0,0003	0,005	0,0071	0,041	649,350

Dopodichè per calcolare le perdite nel ferro specifiche che ciascuna delle sei armoniche comporta nel circuito ferromagnetico di statore è stata applicata la relazione di **Steinmetz**, ovvero:

$$P_{FEk} = K_{ist} \cdot B_k^\alpha \cdot \left(\frac{f_k}{50}\right) + K_{cp} \cdot B_k^2 \cdot \left(\frac{f_k}{50}\right)^2 \quad (6.3)$$

I risultati ottenuti sono stati riportati nella seguente tabella insieme ai valori di ampiezza e fase delle armoniche del campo d'induzione magnetica b:

Tabella 6.4: Perdite specifiche nel ferro causate dalle singole armoniche

ARMONICA	ak [T]	bk [T]	Beffk [T]	Bmax [T]	Phase [rad]	f [Hz]	PFe [W/Kg]
1	0,4294	0,0811	0,3399	0,4807	-0,241	108,225	1,552
2	-0,0013	-0,0003	0,0009	0,0013	-0,224	216,450	0,000
3	0,0118	0,0043	0,0089	0,0126	-0,353	324,675	0,006
4	0,0042	-0,0048	0,0045	0,0064	0,853	432,900	0,003
5	0,0081	-0,0001	0,0057	0,0081	0,017	541,125	0,006
6	0,007	-0,0003	0,005	0,0071	0,041	649,350	0,007

Le perdite nel ferro specifiche messe in gioco sono state in calcolate come nel precedente metodo, come somma dei contributi generati da ciascuna delle componenti armoniche:

$$P_{FE} = \sum_{k=1}^n P_{FEk} = 1.574 \quad [W/Kg]$$

Le perdite totali nel ferro messe in gioco nel circuito ferromagnetico di statore e rotore risulteranno pertanto pari a:

$$P_{FEt} = P_{FE} \cdot (G_{st} + G_{rt}) = 1.574 \cdot (0.126 + 0.03) = 0.246 \quad [W]$$

I risultati ottenuti con i due metodi sono davvero molto simili, pertanto si può applicare indifferentemente l'uno o l'altro al fine di stimare le perdite per isteresi magnetica e correnti parassite complessivamente messe in gioco dal circuito ferromagnetico di statore e rotore.

6.7 BILANCIO DELLE POTENZE

Al fine di accertare che le misurazioni di coppia effettuate sul generatore a magnete permanente realizzato abbiano fornito i valori corretti di coppia e di tensione è stato effettuato il bilancio energetico di tutte le potenze messe in gioco in una data condizione di carico.

Si è dunque verificato che la potenza meccanica fornita al generatore sia uguale alla potenza elettrica complessivamente messa in gioco quando alimenta un carico resistivo di resistenza pari a 5 $[\Omega]$ in regime sinusoidale, per una velocità angolare meccanica pari a 143.31 $[\text{rad/s}]$.

Potenza meccanica

Per stimare la potenza meccanica fornita al generatore a magnete permanente mediante il solito motore DC nelle suddette condizioni di carico è stato stimato il valore medio della coppia agente sul rotore precedentemente misurata mediante torsionometro meccanico.

Il calcolo è stato eseguito mediante foglio elettronico EXCEL applicando la funzione che permette di calcolare la media dei valori di coppia precedentemente misurati, pertanto il valore medio di coppia stimato è risultato pari a:

$$T_m = 16.1 \quad [mNm]$$

Nella Fig.6.12 della pagina successiva viene riportato l'andamento grafico della coppia misurata con torsionometro meccanico al netto dell'offset, corrispondente alla massima velocità angolare raggiungibile (143.31 $[\text{rad/s}]$), quando il generatore a magnete permanente alimenta un carico di resistenza pari a 5 $[\Omega]$ in regime sinusoidale.

Sempre nella stessa figura viene riportata la retta orizzontale che rappresenta il valore medio stimato della coppia sul rotore.

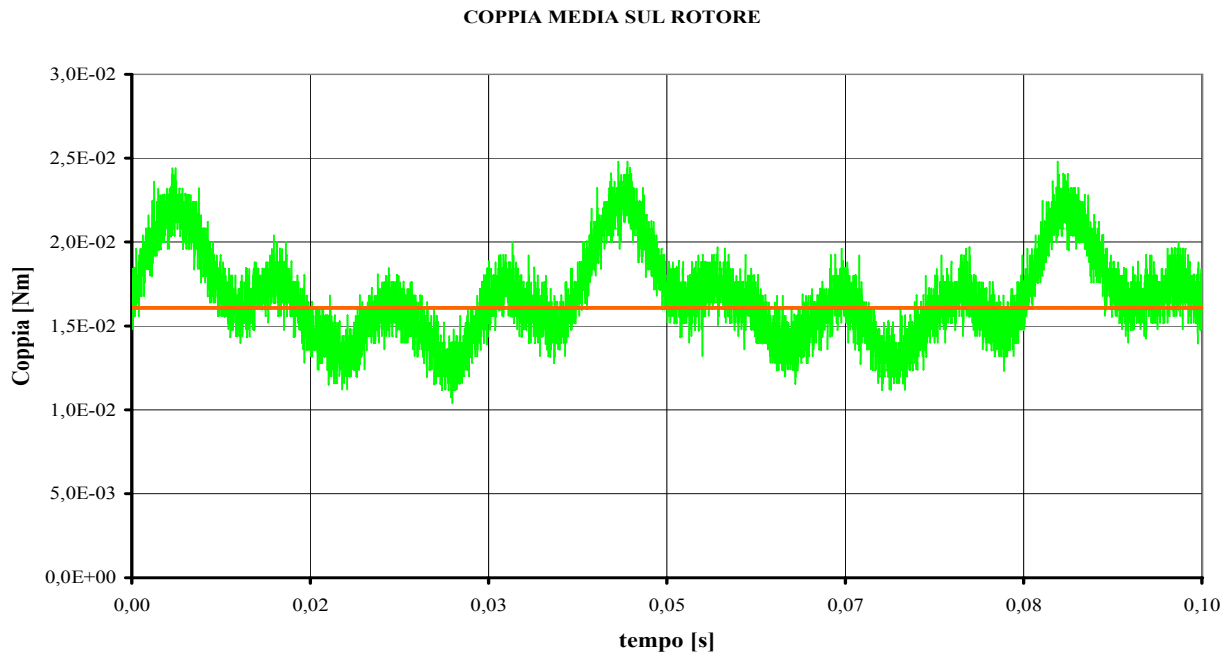


Fig. 6.12: Coppia media stimata a regime sinusoidale per $\omega_m = 143.31$ [rad/s] ed $R = 5[\Omega]$

La potenza meccanica che il motore DC trasmette al generatore a magnete permanente nelle suddette condizioni di carico risulterà dunque pari a:

$$P_m = \omega_m \cdot T = 143.31 \cdot 1.61 \cdot 10^{-2} = 2.31 \quad [W]$$

Trascurando le perdite meccaniche dovute all' attrito, la potenza meccanica così calcolata viene convertita dal generatore in potenza elettrica, di cui una parte viene dissipata per effetto joule negli avvolgimenti di statore, una parte viene dissipata nel circuito ferromagnetico, ed infine la potenza rimanente viene trasmessa al carico.

Potenza elettrica

Per prima cosa si è proceduto alla stima della potenza elettrica trasferita al carico resistivo, per far questo si è dovuto visualizzare mediante oscilloscopio digitale la forma d' onda della tensione applicata al carico nelle suddette condizioni di lavoro, il cui grafico in funzione del tempo viene riportato in Fig.6.13 della pagina successiva.

Osservando la forma d' onda della tensione riportata è stato riscontrato un valore di picco di valore pari a:

$$V_{max} = 3.11 \quad [V]$$

L' andamento grafico della tensione ottenuta non costituisce una sinusoide, pertanto non è immediato risalire al corrispondente valore efficace.

Al fine di effettuarne una stima è stata eseguita la scomposizione in serie di Fourier della forma d' onda della tensione ottenuta, il cui contenuto armonico viene riportata in Fig.6.14 della pagina successiva; il valore massimo dell' armonica fondamentale è risultata dunque pari a:

$$V1_{max} = 2.31 \quad [V]$$

Confrontando il valore di picco ottenuto con l' ampiezza della prima armonica si riscontra una differenza di circa 0.8 [V], questo è dovuto al contenuto armonico non indifferente della tensione sul carico, come dimostra il corrispondente valore del Total Harmonic Distortion pari al 33%.

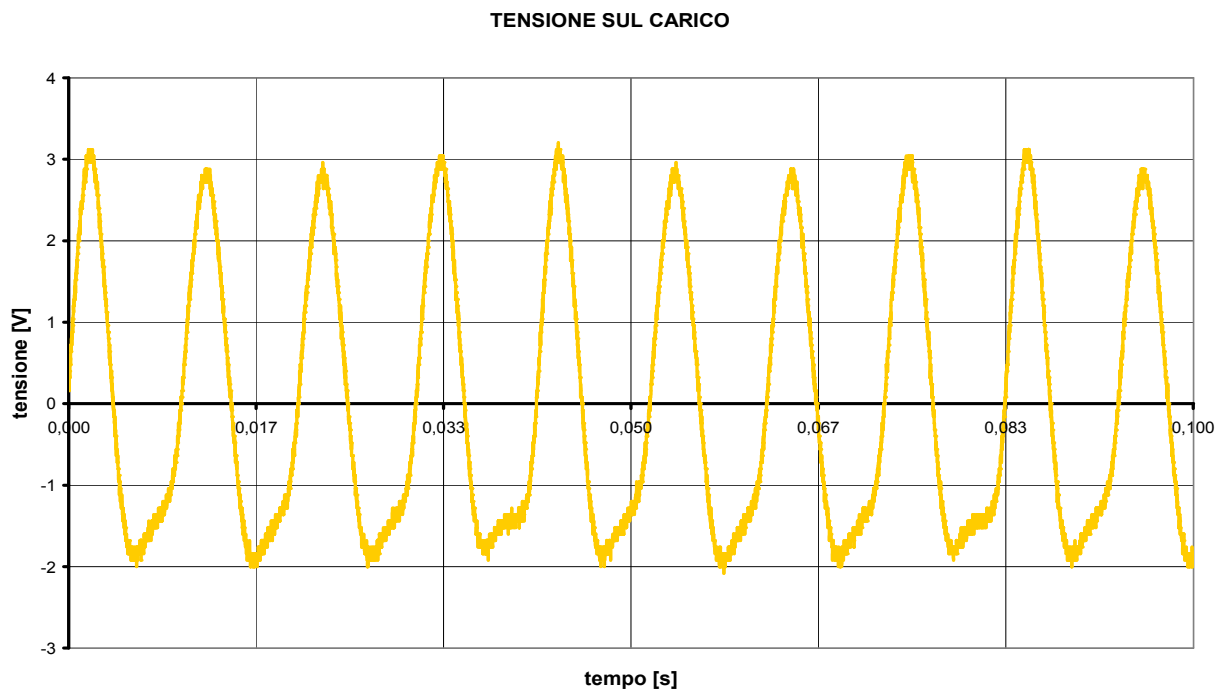


Fig. 6.13: Tensione ai capi del carico resistivo per $\omega_m = 143.31[\text{rad/s}]$

Si riporta nella sottostante figura la scomposizione in serie di Fourier della tensione sul carico resistivo, nella quale si possono notare le prime cinque armoniche di maggiore ampiezza.

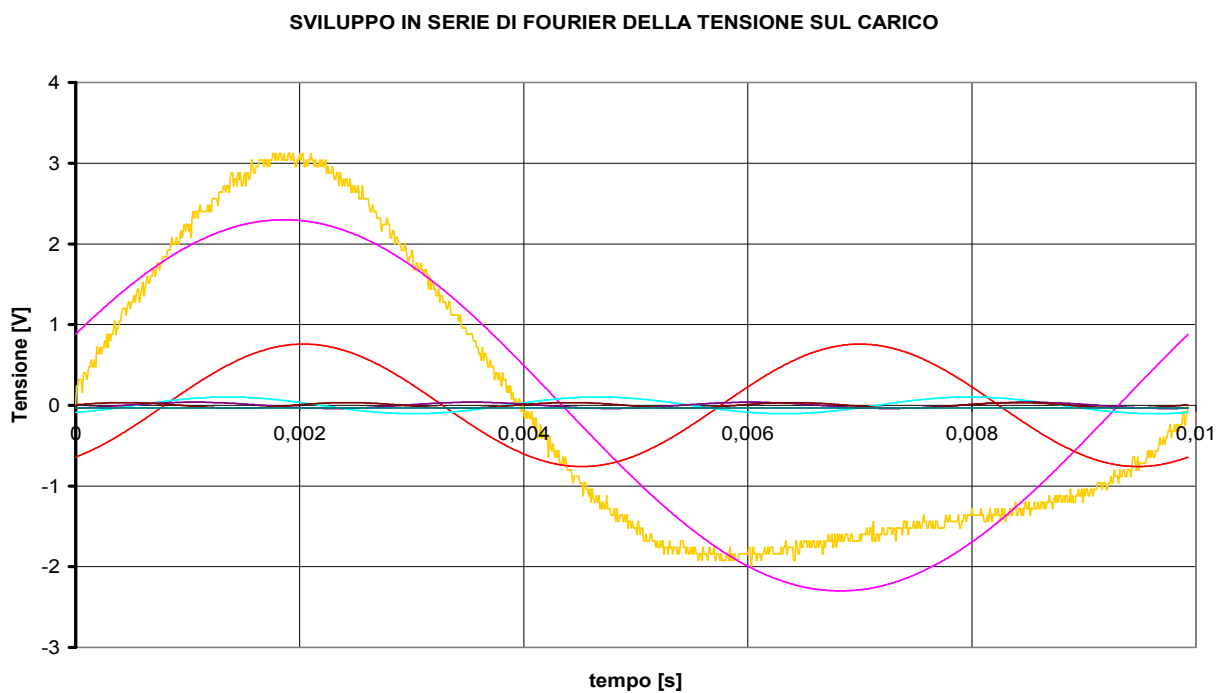


Fig. 6.14: Sviluppo in serie di Fourier della tensione applicata al carico

Al fine di stimare la potenza elettrica assorbita dal carico è possibile approssimare il valore efficace della tensione applicata con il valore efficace della prima armonica, ovvero:

$$V_{eff} = \frac{V_{1max}}{\sqrt{2}} = \frac{2.31}{\sqrt{2}} = 1.63 \quad [V]$$

Il valore efficace della corrente che attraversa la resistenza di carico in regime sinusoidale si può stimare semplicemente applicando la nota legge di Ohm, ovvero:

$$I_{eff} = \frac{V_{eff}}{R} = \frac{1.63}{5} = 0.326 \quad [A]$$

La quale risulta abbastanza prossima ma in ogni caso inferiore al valore nominale della corrente tollerabile dagli avvolgimenti di statore pari a 0.5 [A].

La potenza elettrica assorbita dal carico nelle suddette condizioni di funzionamento risulteranno pertanto:

$$P_R = \frac{V_{eff}^2}{R} = \frac{1.63^2}{5} = 0.531 \quad [W]$$

Mentre le perdite nel rame per effetto joule generate dalla corrente che attraversa gli avvolgimenti di statore connessi in serie risultano pari a:

$$P_j = 2 \cdot R_{avv} \cdot I_{eff}^2 = 2 \cdot 6.3 \cdot 0.326^2 = 1.34 \quad [W]$$

Per quanto riguarda le perdite nel ferro dovute all'isteresi magnetica ed alla circolazione di correnti parassite, esse si possono stimare con la nota formula di Steinmetz:

$$P_{FEk} = K_{ist} \cdot B_k^\alpha \cdot \left(\frac{f_k}{50}\right) + K_{cp} \cdot B_k^2 \cdot \left(\frac{f_k}{50}\right)^2$$

Per semplicità si ipotizza che le ampiezze delle armoniche del campo d'induzione magnetica stimato nella corona di statore rimangano invariate passando dal funzionamento a vuoto a quello a carico, pertanto le perdite nel ferro specifiche sono esattamente quelle calcolate in precedenza ovvero:

$$P_{FE} = \sum_{k=1}^n P_{FEk} = 1.574 \quad [W/Kg]$$

E quindi le perdite nel ferro a carico in regime sinusoidale siano approssimativamente pari a quelle a vuoto già stimate in precedenza:

$$P_{FEt} = P_{FE} \cdot (G_{st} + G_{rt}) = 1.574 \cdot (0.126 + 0.03) = 0.25 \quad [W]$$

Al fine di verificare che il bilancio delle potenze sia verificato è stata eseguita la somma di tutte le potenze elettriche complessivamente messe in gioco, la quale è risultata pari a:

$$P_e = P_R + P_j + P_{FE} = 0.531 + 1.34 + 0.25 = 2.121 \quad [W]$$

I valori stimati delle potenze meccanica ed elettrica messe in gioco risultano davvero molto vicini, pertanto è lecito affermare che il bilancio delle potenze è stato verificato con esito positivo !

6.8 RENDIMENTO DEL GENERATORE

Il rendimento del generatore a magnete permanente costruito dipende dall'intensità di corrente che attraversa gli avvolgimenti di statore e quindi, considerando il funzionamento a regime sinusoidale, dipende di fatto dal valore della resistenza di carico.

Nelle condizioni di lavoro precedentemente ipotizzate, ovvero $R=5 \text{ } [\Omega]$ ed $\omega_m = 143.31 \text{ } [\text{rad/s}]$ il rendimento risulta essere circa pari a:

$$\eta = \frac{P_R}{P_R + P_j + P_{FE}} = \frac{0.531}{0.531 + 1.34 + 0.25} = 0.25$$

Come si può notare si tratta di un valore di rendimento piuttosto basso, a causa delle notevoli perdite nel rame causate dall'elevata intensità di corrente circolante negli avvolgimenti.

Tuttavia la situazione migliora mano a mano che il valore della resistenza di carico aumenta; al fine di analizzare il rendimento al variare di essa è stata tracciata una curva che permette di ricavare immediatamente il valore di rendimento corrispondente ad una data condizione di lavoro.

Si consideri l'espressione che permette di determinare il rendimento del generatore in funzione del valore efficace della corrente erogata, ovvero:

$$\eta = \frac{R \cdot I_{eff}^2}{R \cdot I_{eff}^2 + P_{FE} + 2 \cdot R_{avv} \cdot I_{eff}^2} \quad (6.4)$$

Ritenendo costanti le perdite nel ferro nella (6.4) al variare della resistenza di carico, si nota che il rendimento del generatore dipende sostanzialmente dalla corrente circolante, pari a:

$$I_{eff} = \frac{V_0}{R + 2 \cdot R_{avv}} \quad (6.5)$$

Assegnando dei valori ad R , introducendoli nella (6.5) e riportandoli in grafico è possibile tracciare la curva del rendimento al variare della resistenza di carico, come si può osservare nella sottostante figura:

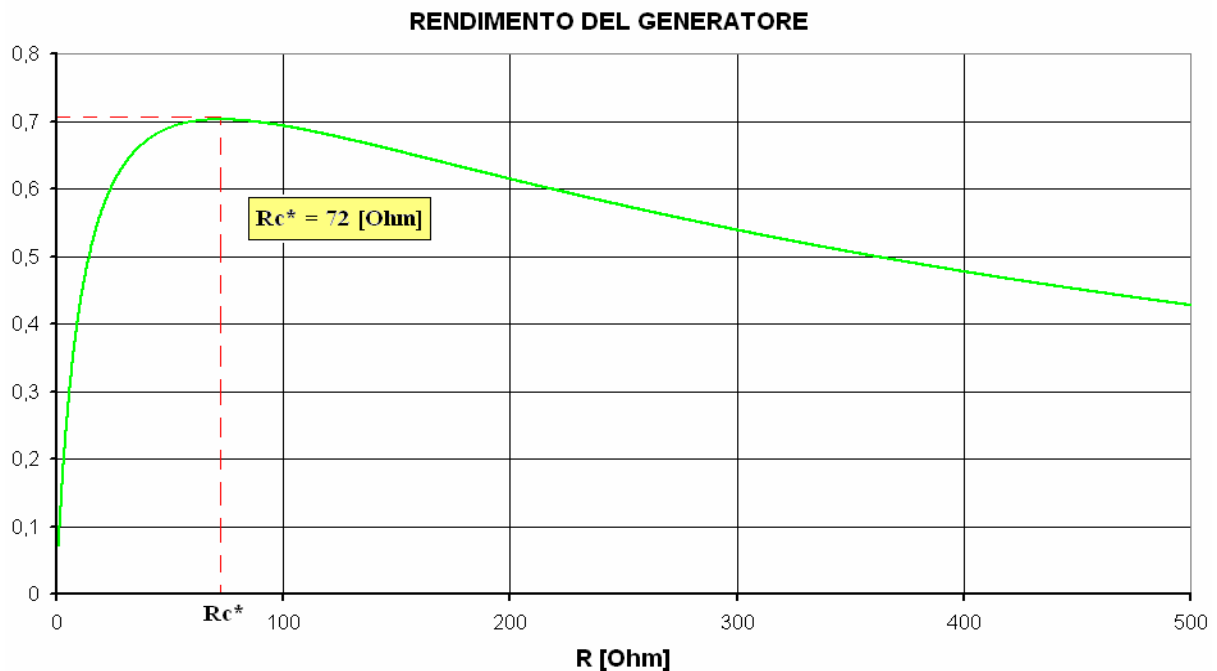


Fig. 6.15: Curva del rendimento in funzione della resistenza di carico

Capitolo 7

GENERATORE A MAGNETE PERMANENTE BIPOLARE

Dopo aver costruito il generatore a magnete permanente per microturbina ed aver verificato sia tramite programma di simulazione sia mediante misure sperimentali che presenti tutte le caratteristiche desiderate, si è proceduto alla realizzazione di un secondo modello di generatore, la cui configurazione geometrica è stata ottenuta apportando una modifica alla geometria del modello definitivo precedentemente analizzato.

Più precisamente si è deciso di realizzare un generatore a magnete permanente a due poli semplicemente eliminando dal modello precedente i due denti di statore introdotti e opportunamente sagomati allo scopo di convogliare il flusso magnetico verso il rotore.

Nella seguente figura viene riportato il progetto del generatore a due poli rappresentato in scala:

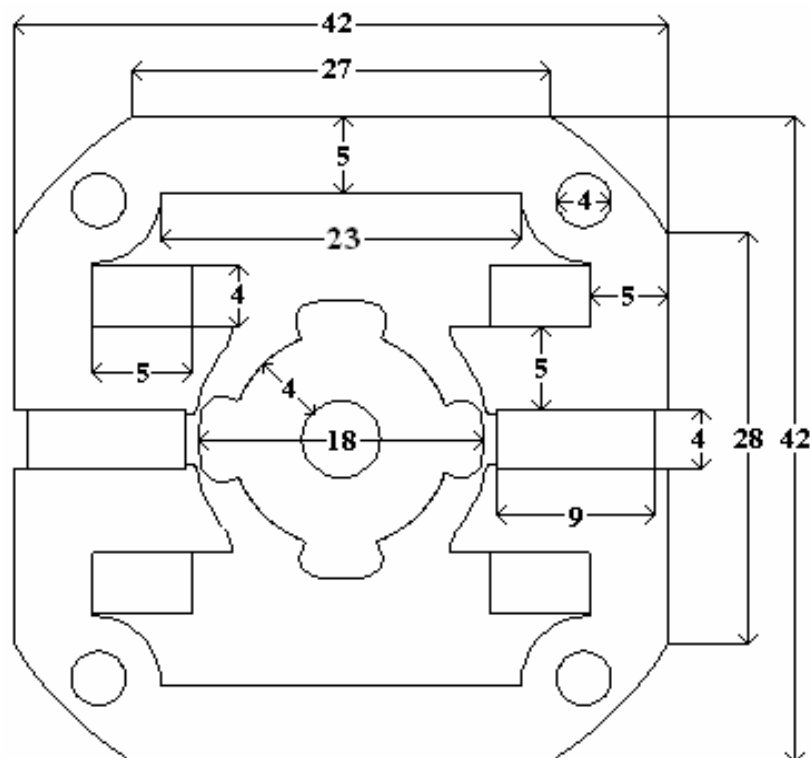


Fig. 7.1: Generatore a magnete permanente a due poli - SCALA 2:1

Lo scopo del progetto di un nuovo generatore è del tutto sperimentale, ossia una volta progettato e realizzato il modello che presenta le migliori prestazioni in assoluto si è voluto realizzarne uno simile da esso derivato solamente per studiarne il comportamento elettromeccanico.

7.1 SIMULAZIONE DEL MODELLO A VUOTO

Una volta stabilita la geometria del nuovo modello di generatore è stata eseguita l'analisi a vuoto mediante software di simulazione FEMM, al fine di determinare l'andamento dei campi \vec{B} ed \vec{H} nelle varie regioni e al traferro.

Le procedure seguite per definire il problema da analizzare mediante simulazione sono del tutto analoghe a quelle già seguite durante l'analisi dei precedenti modelli, le quali vengono riportate come promemoria:

Definizione del problema

Per prima cosa è necessario definire il tipo di modello da porre sotto analisi, introducendo i dati iniziali necessari alla risoluzione del problema. Nell'ambiente di lavoro FEMM, accedendo alla voce *Problem definition* sono state introdotte le seguenti impostazioni:

- *Problem type*: Planar
- *Length units*: Millimeters
- *Frequency*: 0 [Hz]
- *Depth*: 20 [mm]
- *Solver precision*: $1 \cdot 10^{-8}$

Disegno della geometria

Una volta definito il problema da risolvere si è proceduto a disegnare nella finestra grafica iniziale la configurazione geometrica del modello di microturbina prestabilito, la quale viene riportata nella sottostante figura:

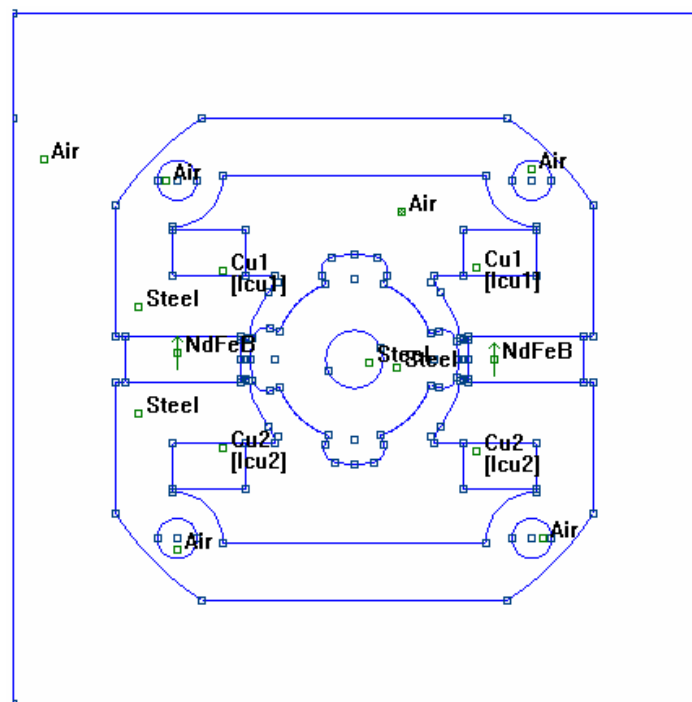


Fig. 7.2: Generatore a magnete permanente bipolare

Condizioni al contorno

Tra i dati iniziali necessari alla risoluzione del problema definito rientrano certamente le condizioni al contorno, le quali forniscono importanti informazioni sull' andamento delle linee di campo lungo i bordi del dominio. Come nei precedenti modelli sono state introdotte le seguenti condizioni:

- *Condizione di Neumann*: è stata assegnata la condizione $\frac{d\vec{A}}{dn} = 0$
- *Condizione di Dirichlet*: è stata assegnata la condizione $\vec{A} = 0$

Definizione dei materiali

Disegnata la configurazione geometrica del modello da analizzare ed introdotte le condizioni al contorno si passa dunque alla definizione dei materiali con i quali verrà costruita la microturbina. Si elencano qui di seguito le caratteristiche fisiche dei materiali definiti:

- *Acciaio*:
è il materiale ferromagnetico con il quale si prevede di realizzare il rotore ed il nucleo di statore della microturbina, è caratterizzato dalle seguenti grandezze fisiche:
 - permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 760$
 - permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 760$
 - curva di magnetizzazione $B = f(H)$ non lineare:

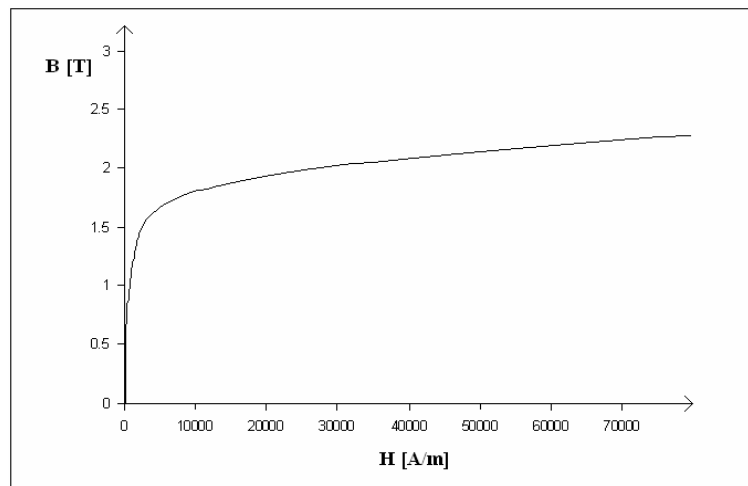


Fig. 7.3: Curva di magnetizzazione dell' acciaio

- *Aria*:
è il materiale che circonda il modello di microturbina che si prevede di realizzare, esso sarà caratterizzato dalle seguenti caratteristiche:
 - permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
 - conducibilità elettrica $\sigma = 0$ [Ms/m].
- *Rame*:
è il materiale con il quale si prevede di realizzare l' avvolgimento di statore sede di forza elettromotrice indotta, il quale presenta le seguenti caratteristiche:
 - permeabilità magnetica relativa: $\mu_r = 1$
 - conducibilità elettrica $\sigma = 58$ [Ms/m].
 - curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare.

- *Lega di Neodimio:*

è il materiale con il quale si prevede di realizzare i magneti permanenti della microturbina, ossia la principale sorgente di campo magnetico. In particolare il materiale magnetico impiegato è una lega di Neodimio Ferro e Boro (NdFeB) e presenta le seguenti caratteristiche:

- permeabilità magnetica relativa in direzione x : $\mu_x = 1.048$
- permeabilità magnetica relativa in direzione y : $\mu_y = 1.048$
- campo coercitivo: $H_c = 950000$ [A/m].
- conducibilità elettrica: $\sigma = 0.667$ [Ms/m].
- induzione magnetica residua: $B_{rem} = 1.05$ [T].
- curva di magnetizzazione $B = f(H)$ lineare:

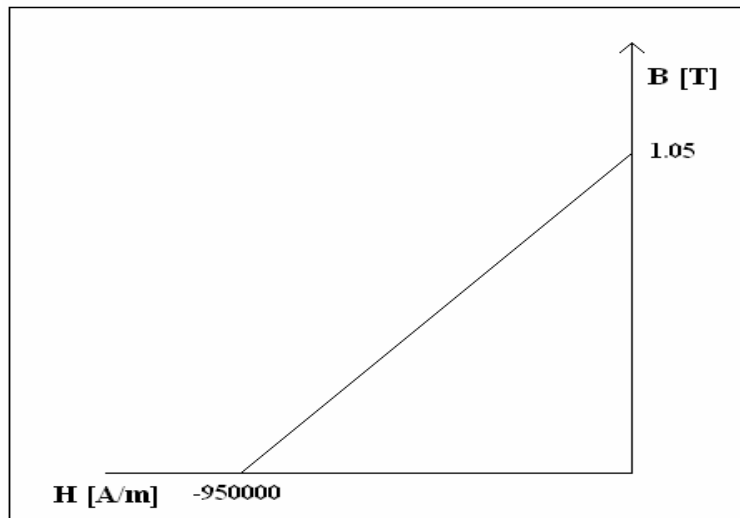


Fig. 7.4: Curva di magnetizzazione del NdFeB

Definizione delle sorgenti

Per definire le sorgenti di campo magnetico occorre distinguere il funzionamento a vuoto da quello a carico. Durante il funzionamento a vuoto l' unica sorgente di campo magnetico è costituita dai magneti permanenti posti sullo statore, mentre nel funzionamento a carico si dovranno considerare come sorgenti di campo anche le forze magnetomotrici generate dalle bobine di statore percorse da corrente.

Creazione della mesh

Come già esposto nei precedenti paragrafi è possibile creare automaticamente la Mesh mandando in esecuzione l' applicazione *triangle.exe*, attivabile dalla schermata principale cliccando sull' opzione *Create Mesh*.

La procedura creazione della Mesh in questo ultimo modello è stata eseguita con cura e precisione, disponendo elementi (triangoli) di minori dimensioni al traferro e nelle zone di maggiore interesse, al fine di ottenere soluzioni il più possibile precise (a discapito purtroppo di una riduzione della velocità computazionale).

In Fig.7.3 della pagina successiva è stata riportata l' immagine raffigurante la mesh ad elementi triangolari costruita sul dominio definito per questo modello di generatore bipolare, come si può notare è stata particolarmente infittita nelle zone del traferro in prossimità dei magneti permanenti posti sullo statore.

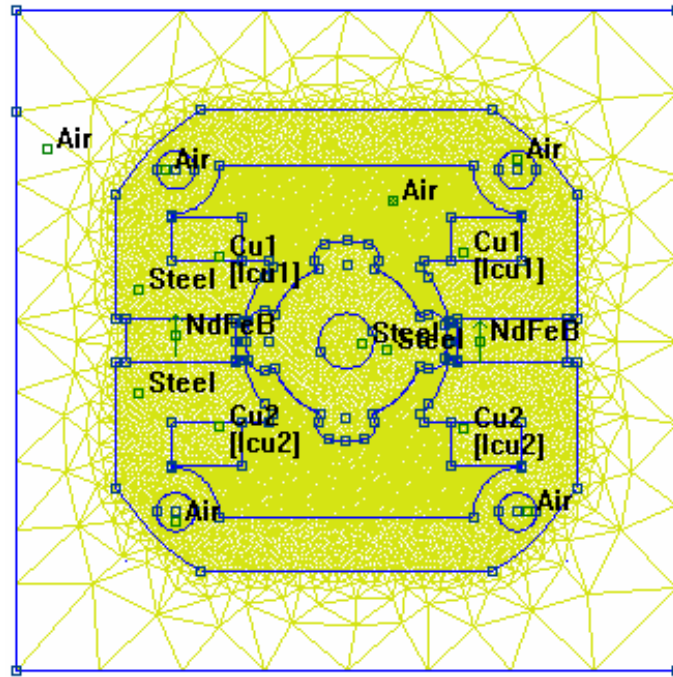


Fig. 7.5: Mesh ad elementi triangolari (generatore a 2 poli)

Visualizzazione dei risultati

Il risultato della simulazione a vuoto eseguita mediante software FEMM viene riportata nella sottostante figura, nella quale le aree colorate rappresentano le zone a diversa densità di campo d' induzione magnetica, mentre le linee grigie riproducono le linee di flusso nel circuito ferromagnetico:

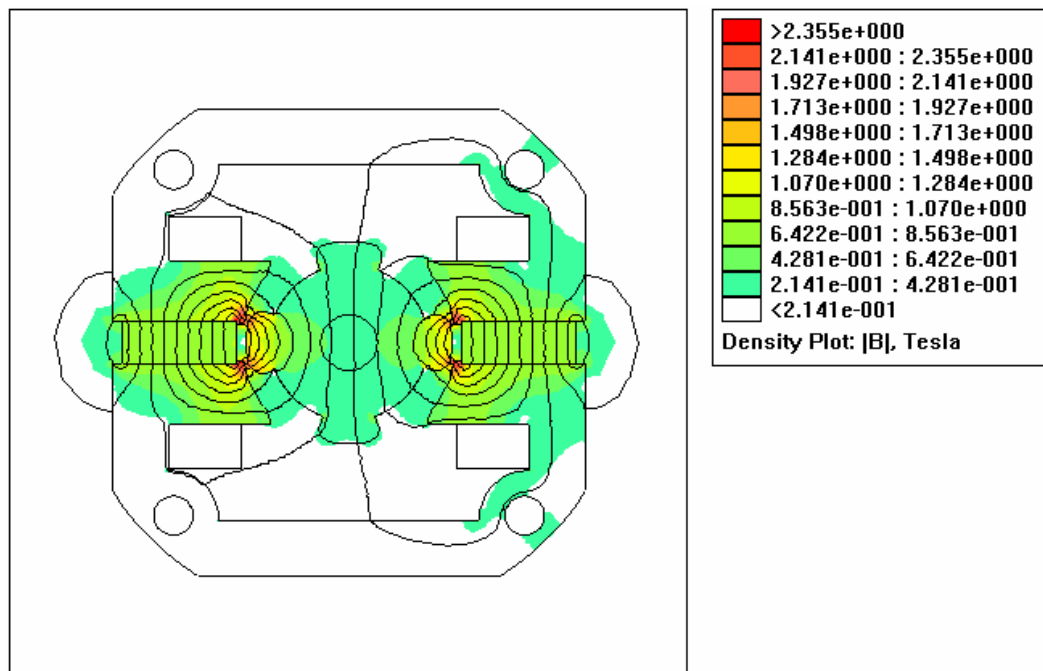


Fig. 7.6: Simulazione a vuoto del modello a 2 poli

Come s può notare dalla precedente figura il flusso magnetico concatenato con gli avvolgimenti di statore risulta praticamente nullo in corrispondenza ad un angolo meccanico pari a $\theta_m = k\pi$, ossia quando il rotore è posizionato come in Fig.7.6.

Potenziale vettore magnetico

Si procede ora all'analisi del potenziale vettore magnetico in funzione della lunghezza del traferro, ricordando che nel caso bidimensionale è costituito dalla sola componente A_z ; confrontando il grafico ottenuto con quello corrispondente del precedente modello a 4 poli si riscontra un significativo aumento dei valori del potenziale vettore magnetico, pari a circa 0.003 [Wb/m].

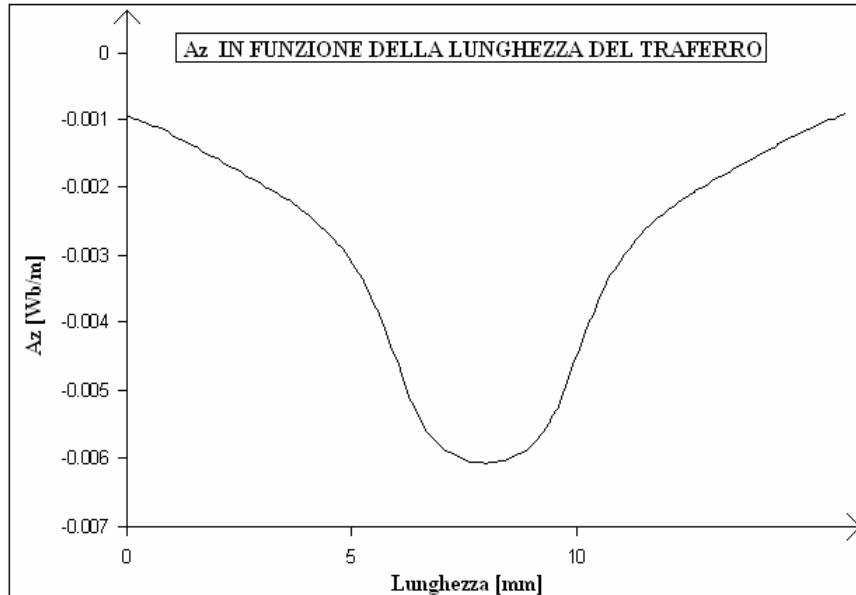


Fig. 7.7: Potenziale vettore magnetico A_z lungo il traferro

Campo d' induzione magnetica

Si riporta nella seguente figura l'andamento grafico del modulo del campo B in funzione della lunghezza del traferro, confrontando i valori ottenuti con quelli del modello precedente si nota un significativo aumento di B nei punti in cui l'ampiezza del traferro è minima, aumento circa pari a 0.5 [T].

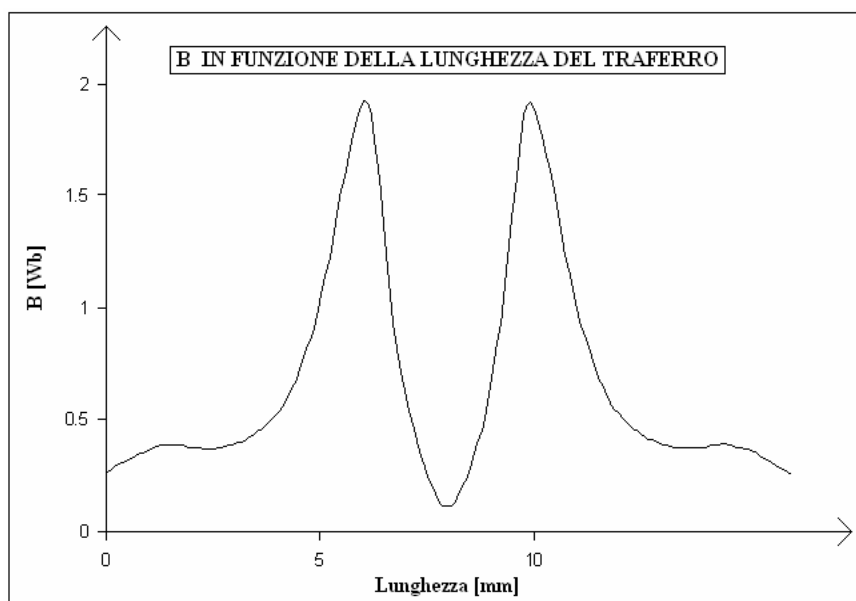


Fig. 7.8: Modulo del campo di induzione magnetica al traferro

Campo magnetico

Si riporta infine la forma d'onda del campo magnetico H lungo il traferro, la quale ovviamente presenta lo stesso andamento del campo B poichè la permeabilità magnetica μ_0 dell'aria è costante.

Rispetto al corrispondente grafico del generatore a magnete permanente a 4 poli si può notare un incremento dei valori di campo in corrispondenza dei punti in cui l'ampiezza del traferro è minima.

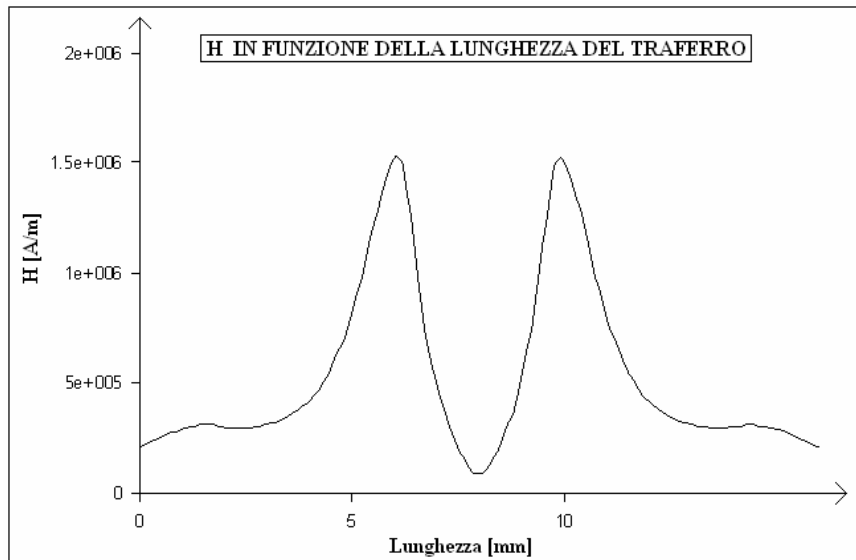


Fig. 7.9: Modulo del campo magnetico \dot{H} al traferro

Si procede ora alla costruzione dei grafici delle grandezze elettromeccaniche di maggior interesse al variare dell'angolo meccanico θ_m .

Grafico del flusso concatenato

Si riporta nella sottostante figura la forma d'onda del flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore al variare della posizione angolare del rotore:

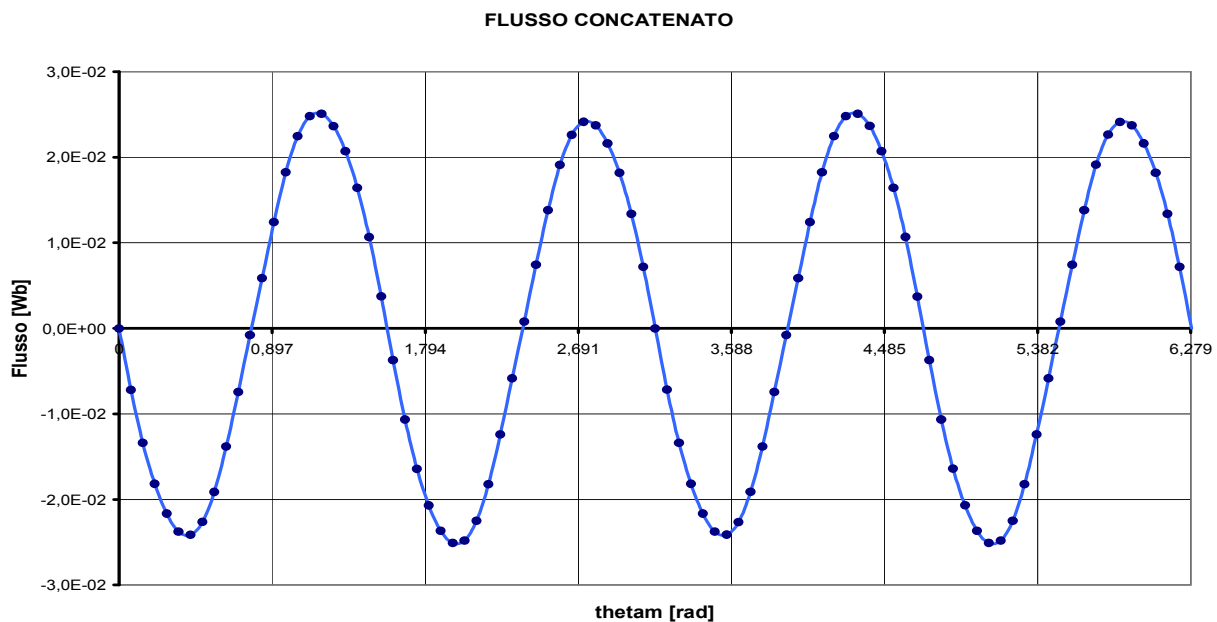


Fig. 7.10: Flusso concatenato in funzione di θ_m (funzionamento a vuoto)

Grafico della coppia

Nella seguente figura viene proposto l'andamento grafico della coppia agente sul rotore del generatore bipolare progettato funzionante a vuoto per diverse posizioni del rotore, ottenuto mediante programma di simulazione FEMM:

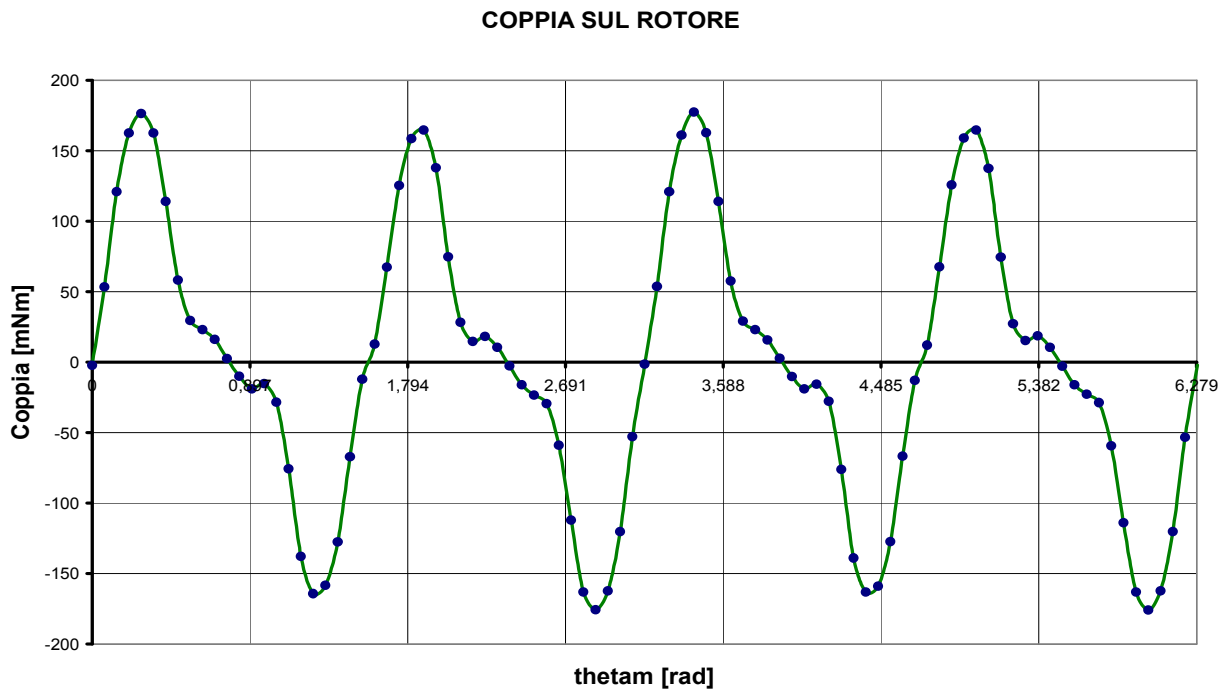


Fig. 7.11: Coppia sul rotore in funzione di θ_m (funzionamento a vuoto)

Grafico dell' energia magnetica

Si riporta qui di seguito il grafico dell' energia magnetica complessivamente messa in gioco nel volume occupato dal modello di generatore bipolare progettato:

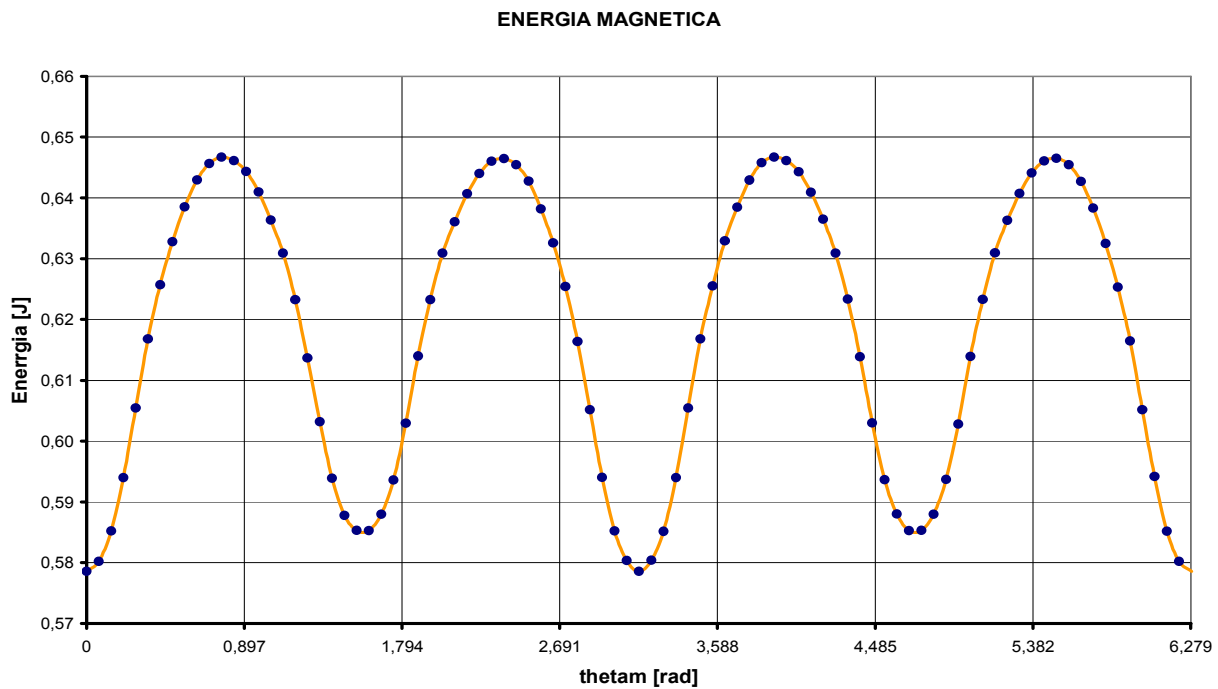


Fig. 7.12: Energia magnetica in funzione di θ_m (funzionamento a vuoto)

Grafico della coenergia magnetica

Nella sottostante figura si può osservare l' andamento grafico della grandezza duale dell' energia, ovvero la coenergia magnetica; essa presenta una forma d' onda del tutto simile a quella dell' energia magnetica riportata in Fig.7.12, questo dimostra che il circuito ferromagnetico lavora in condizioni di linearità nonostante la presenza dei magneti permanenti.

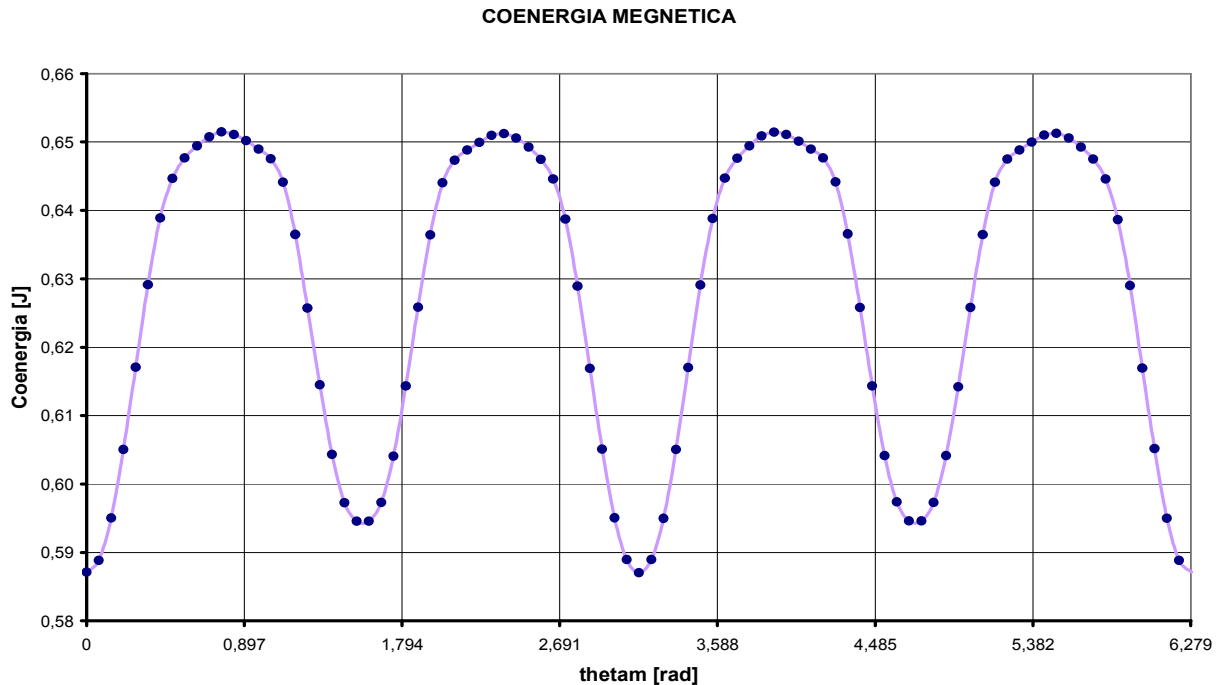


Fig. 7.13: Coenergia magnetica in funzione di θ_m (funzionamento a vuoto)

Forza elettromotrice indotta

Come nell' analisi dei modelli precedenti la forza elettromotrice generata dal generatore a magneti permanente bipolare progettato è stata stimata applicando la nota relazione di Faraday-Neumann:

$$e(t) = - \frac{d\Phi_c(t)}{dt}$$

Al fine di stimare il valore efficace del flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore si è proceduto alla scomposizione in serie di Fourier dello stesso mediante il consueto script in codice MATLAB applicato nei precedenti modelli; il valore efficace e la fase delle armoniche ottenute vengono riportate nella tabella sottostante:

Tabella 7.1: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$

ORDINE DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Fk [Wb]	øk [rad]
1	-4,18E-04	-2,49E-02	0,0176	-1,554
2	-5,50E-06	0	0	1,4024
3	-2,55E-05	-2,00E-04	0,0001	-1,4149
4	-3,44E-05	-3,00E-04	0,0002	-1,4585
5	-8,30E-06	0	0	0,9457

I tre principali parametri che consentono di stimare il grado di distorsione armonica della forma d'onda del flusso concatenato sono risultati rispettivamente pari a:

$$F = 1.76 \cdot 10^{-2} \quad [Wb]$$

$$F_{dis} = 5.45 \cdot 10^{-4} \quad [Wb]$$

$$THD = 3.10\%$$

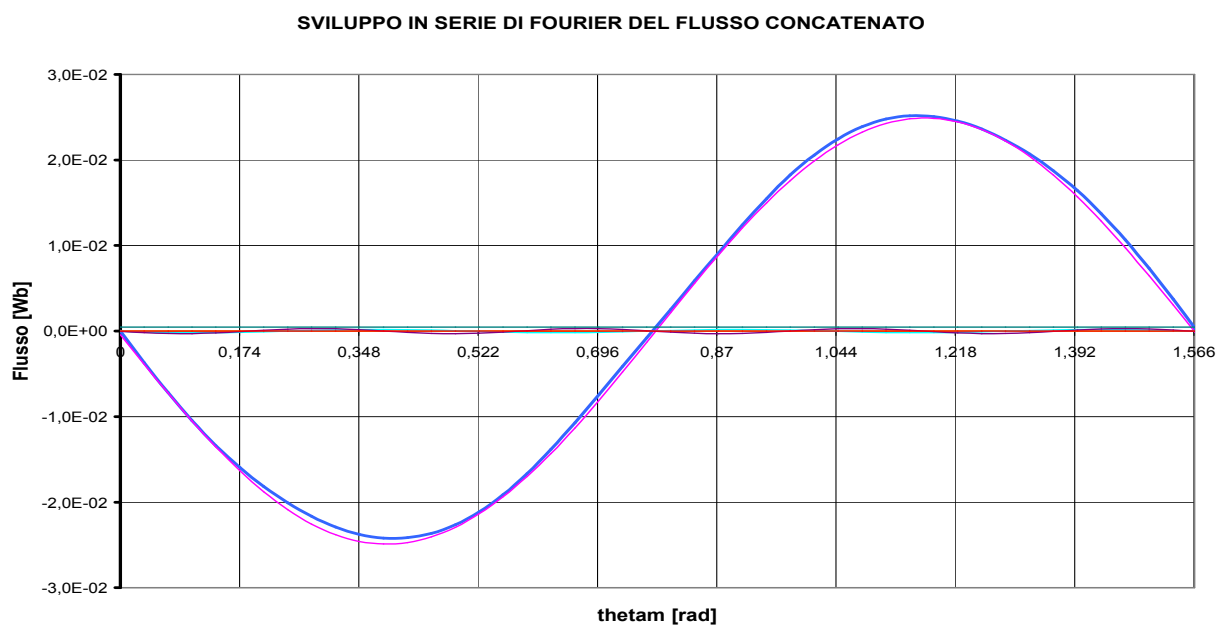


Fig. 7.14: Contenuto armonico del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ (funzionamento a vuoto)

Dopo aver determinato le ampiezza delle armoniche fondamentali del flusso concatenato è stato possibile tracciare il grafico della tensione indotta in funzione dell'angolo meccanico θ_m :

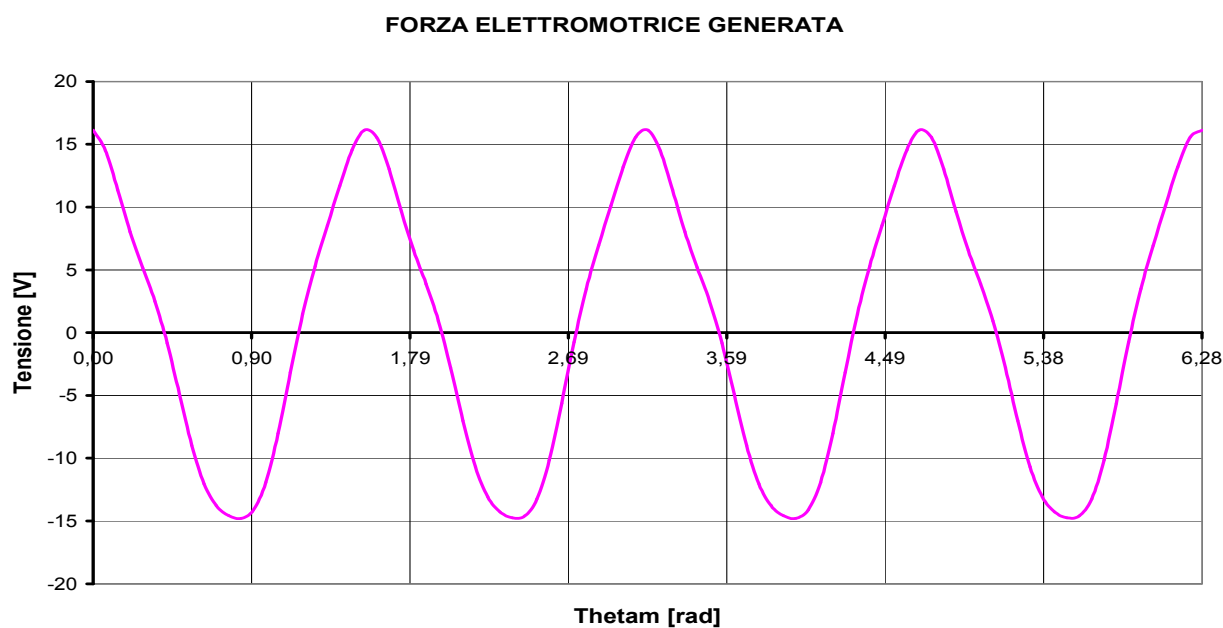
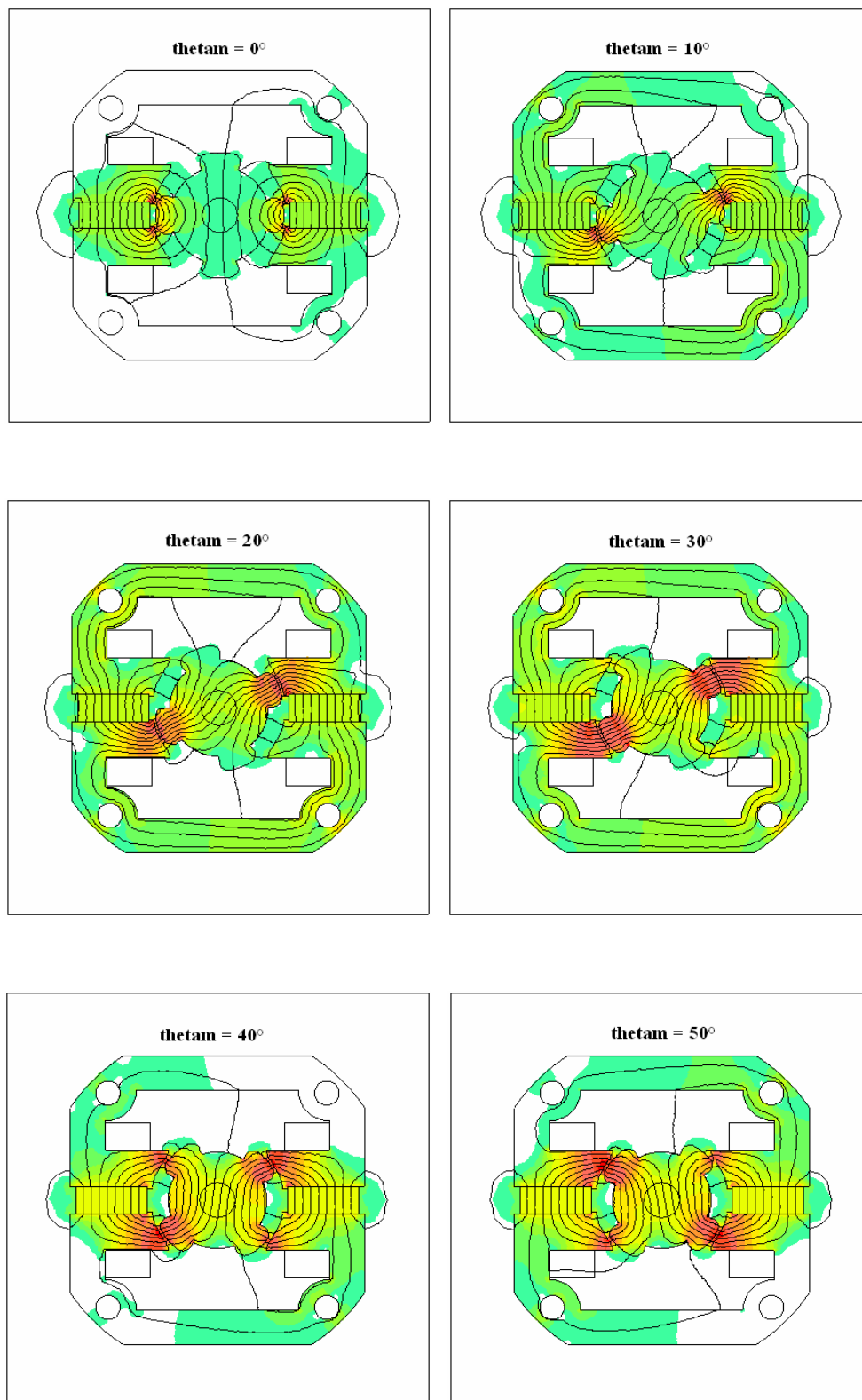
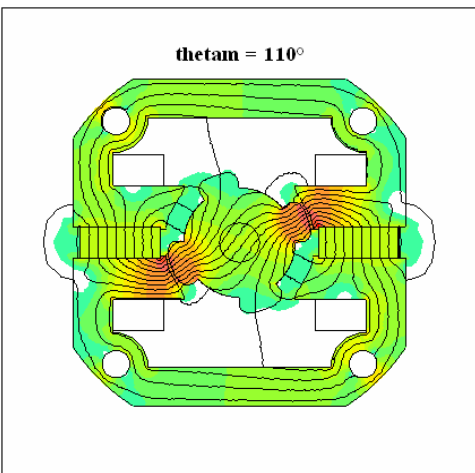
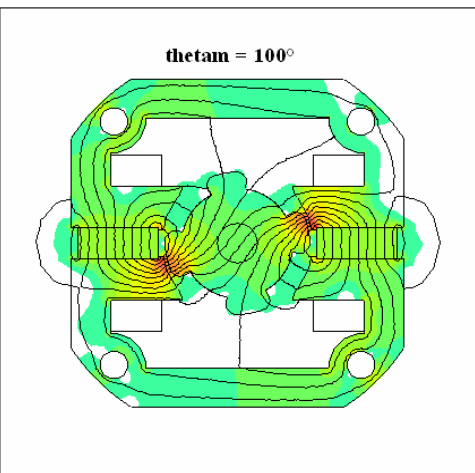
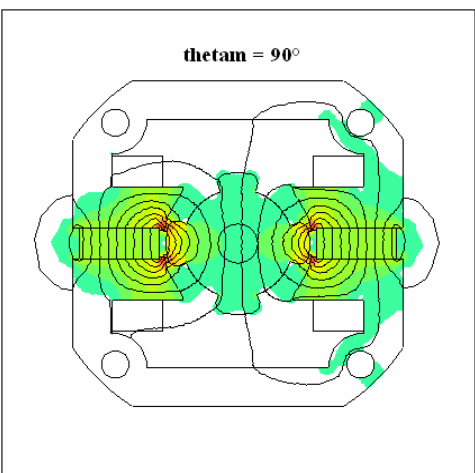
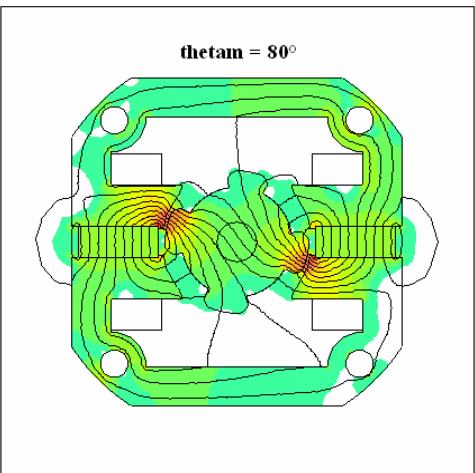
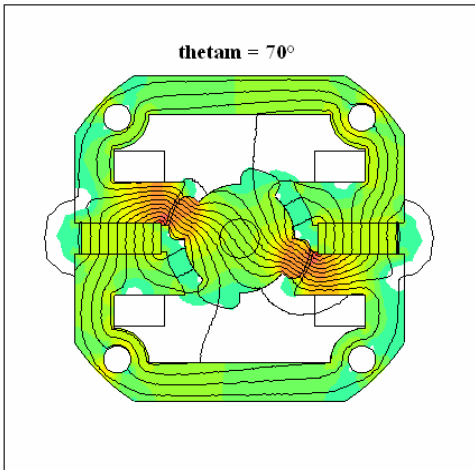
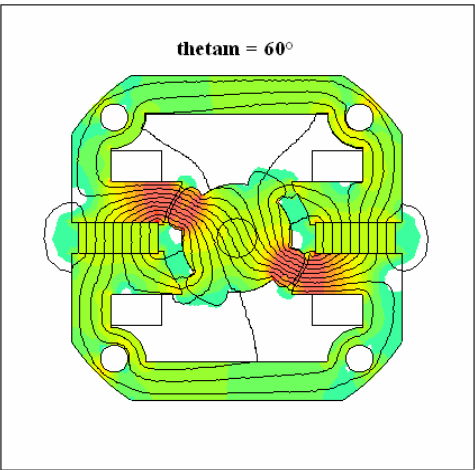
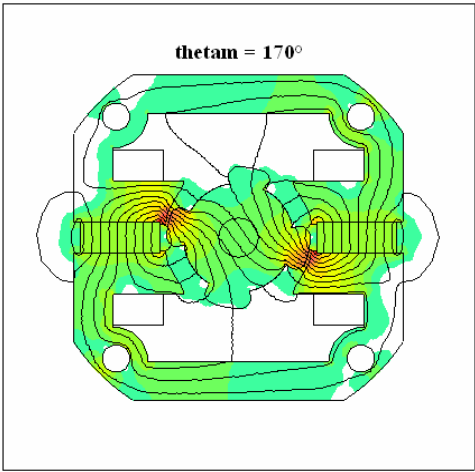
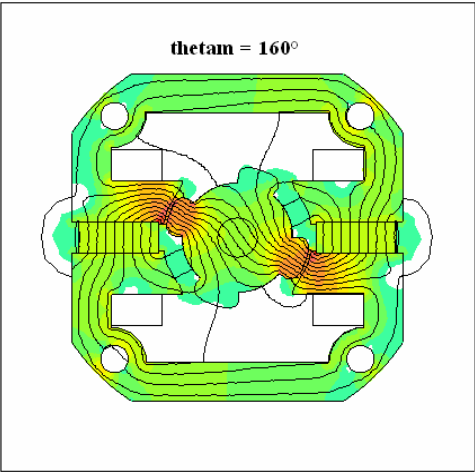
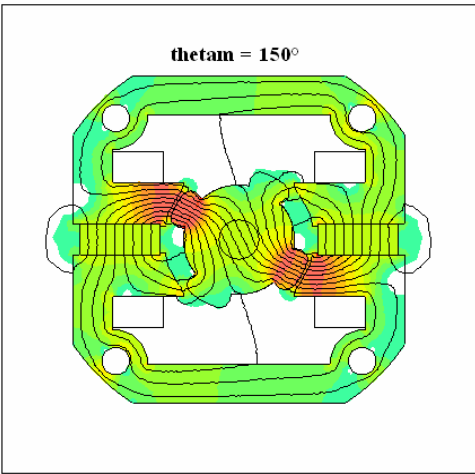
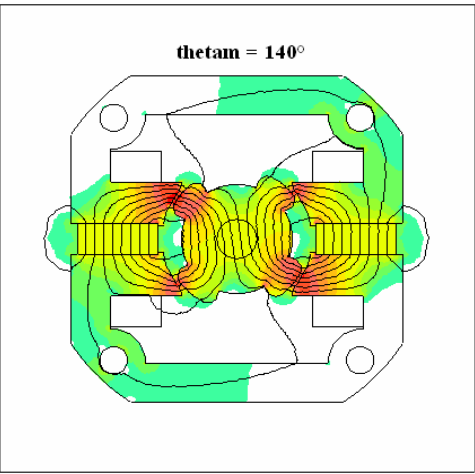
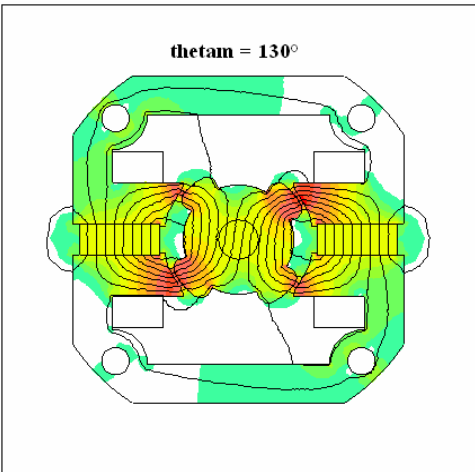
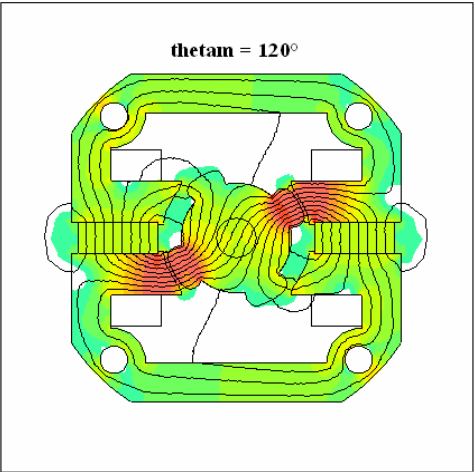


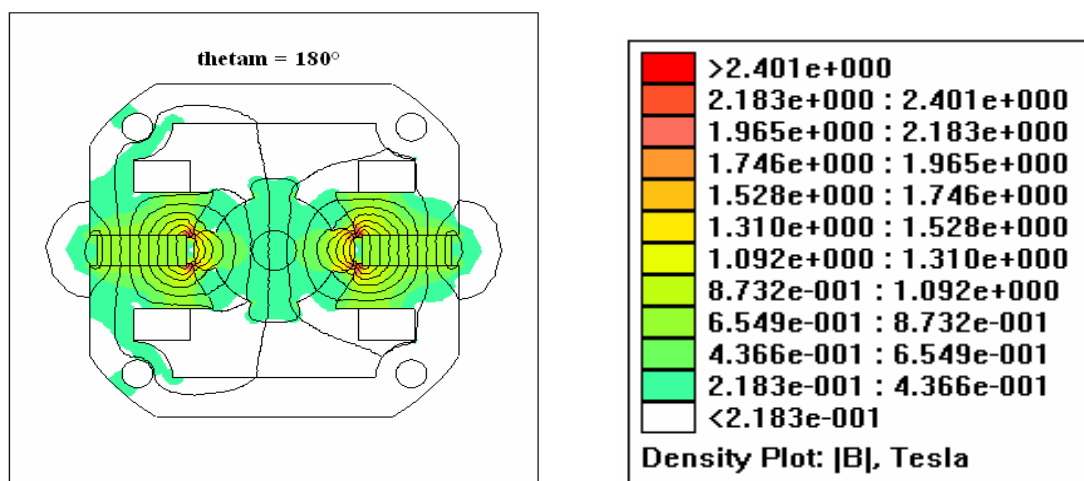
Fig. 7.15: Forza elettromotrice generata a vuoto dal generatore bipolare

ANALISI A VUOTO AL VARIARE DI θ_m :









7.2 SIMULAZIONE A CARICO IN REGIME SINUSOIDALE

Una volta analizzato il comportamento del generatore a magnete permanente bipolare a vuoto mediante programma di simulazione è stata eseguita l'analisi a carico in regime sinusoidale, supponendo che il carico sia costituito da una pura resistenza di valore pari a 100 $[\Omega]$.

Il valore massimo di corrente erogata dal generatore in corrispondenza alla massima velocità di rotazione raggiungibile (170 $[\text{rad/s}]$) dovrebbe essere pari a:

$$I_{max} = \frac{E_0}{R} = \frac{16.932}{100} = 0.169 \quad [A]$$

La forza magnetomotrice generata dalla corrente che percorre gli avvolgimenti di statore si può esprimere in funzione dell'angolo meccanico θ_m mediante la seguente espressione:

$$m(\theta_m) = -M \cos(2p\theta_m)$$

Il cui valore massimo M si può stimare tramite la seguente espressione:

$$M = 2 \cdot nc \cdot I_{max} = 2 \cdot 200 \cdot 0.169 = 67.6 \quad [A]$$

Al fine di analizzare il comportamento elettromagnetico del generatore in regime sinusoidale mediante software FEMM è stata imposta nella regione occupata dal rame degli avvolgimenti una densità di corrente pari a:

$$J = \frac{M}{S_{cu}} = \frac{67.6}{51.6} = 1.31 \quad [A/mm^2]$$

Il risultato della simulazione ottenuta mediante software FEMM nelle suddette condizioni di carico corrispondente ad un valore di angolo meccanico $\theta_m = 0$ viene qui di seguito riportata:

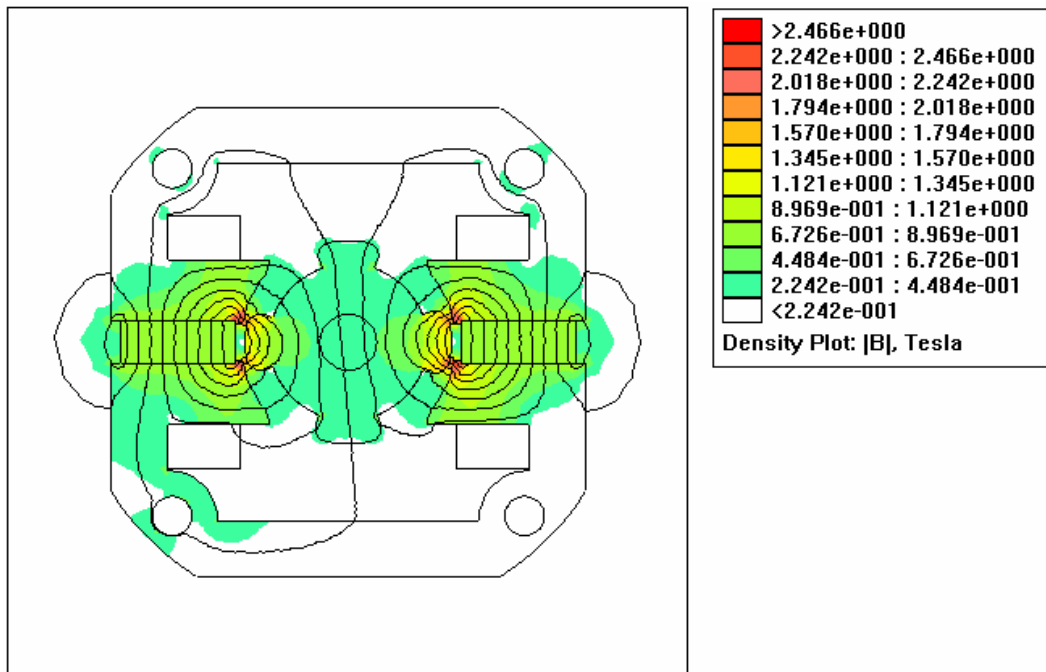


Fig. 7.16: Simulazione a regime sinusoidale del generatore bipolare

Nella Fig.7.16 sopra riportata viene messo in evidenza l'intensità di campo d'induzione magnetica nelle diverse regioni del modello definito; è interessante notare come la presenza di corrente eserciti un effetto distorcente sul flusso generato dai magneti permanenti, riducendo al minimo l'intensità del campo B nella corona di statore.

Venendo a mancare i due denti di statore il flusso risultante si ritrova ad attraversare un' ampiezza di traferro ben più elevata, incontrando una notevole riluttanza.

Potenziale vettore magnetico

Viene riportato nella sottostante figura l' andamento grafico del potenziale vettore magnetico A_z lungo il traferro, considerando il generatore funzionante a regime sinusoidale alla massima velocità di rotazione $\omega_m = 170$ [rad/s].

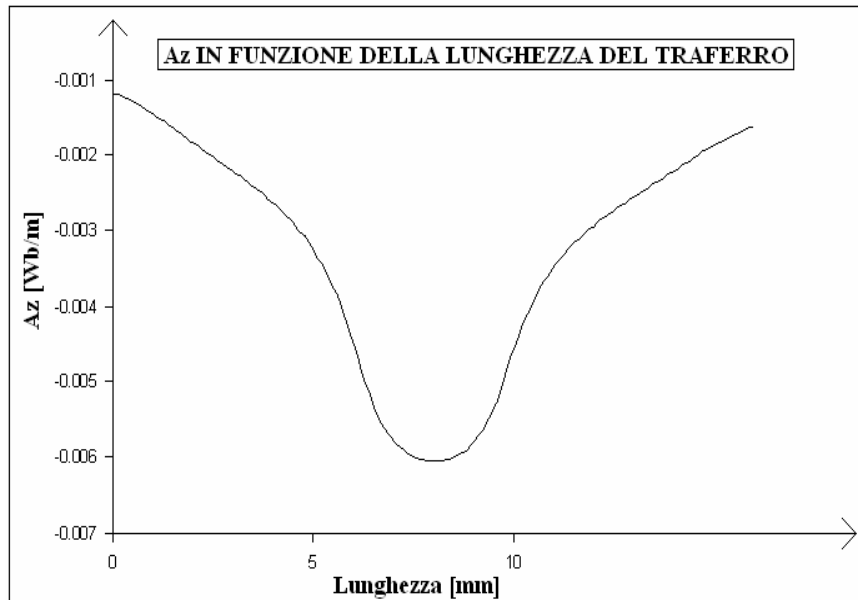


Fig. 7.17: Potenziale vettore magnetico A_z lungo il traferro a regime sinusoidale

Campo d' induzione magnetica

Si riporta nella figura seguente la forma d' onda del campo d' induzione magnetica in funzione della lunghezza del traferro in prossimità dei magneti permanenti di statore, considerando il generatore funzionante in regime sinusoidale con densità di corrente negli avvolgimenti pari a $J=1.31$ [A/mm²].



Fig. 7.18: Campo d' induzione magnetica lungo il traferro a regime sinusoidale

Campo magnetico

Viene infine riportato l'andamento grafico del campo magnetico H lungo il traferro, il quale sarà certamente caratterizzato dalla stessa forma del campo d'induzione magnetica B .



Fig. 7.19: Campo magnetico lungo il traferro a regime sinusoidale

Analizzata la conformazione dei campi B ed H lungo il traferro in regime sinusoidale si è proceduto alla realizzazione dei grafici di coppia, flusso concatenato, forza elettromotrice generata, energia e coenergia magnetica in funzione della posizione del rotore mediante il solito script in codice MATLAB.

Grafico del flusso concatenato

Si riporta nella sottostante figura il grafico del flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore in funzione dell'angolo meccanico θ_m , ottenuto mediante software di simulazione FEMM nelle condizioni di carico precedentemente definite:

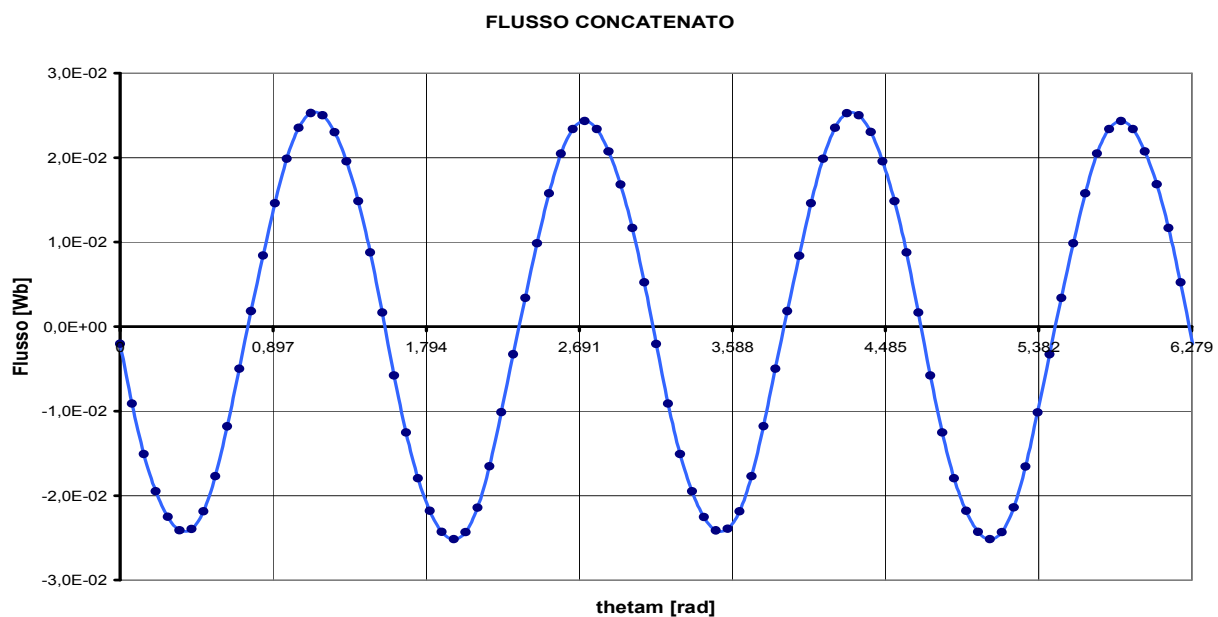


Fig. 7.20: Flusso concatenato in funzione di θ_m in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Grafico della forza magnetomotrice

Nella seguente figura viene riportato l'andamento grafico della forza magnetomotrice generata dalla corrente alternata che percorre gli avvolgimenti di statore del generatore a magnete permanente bipolare progettato.

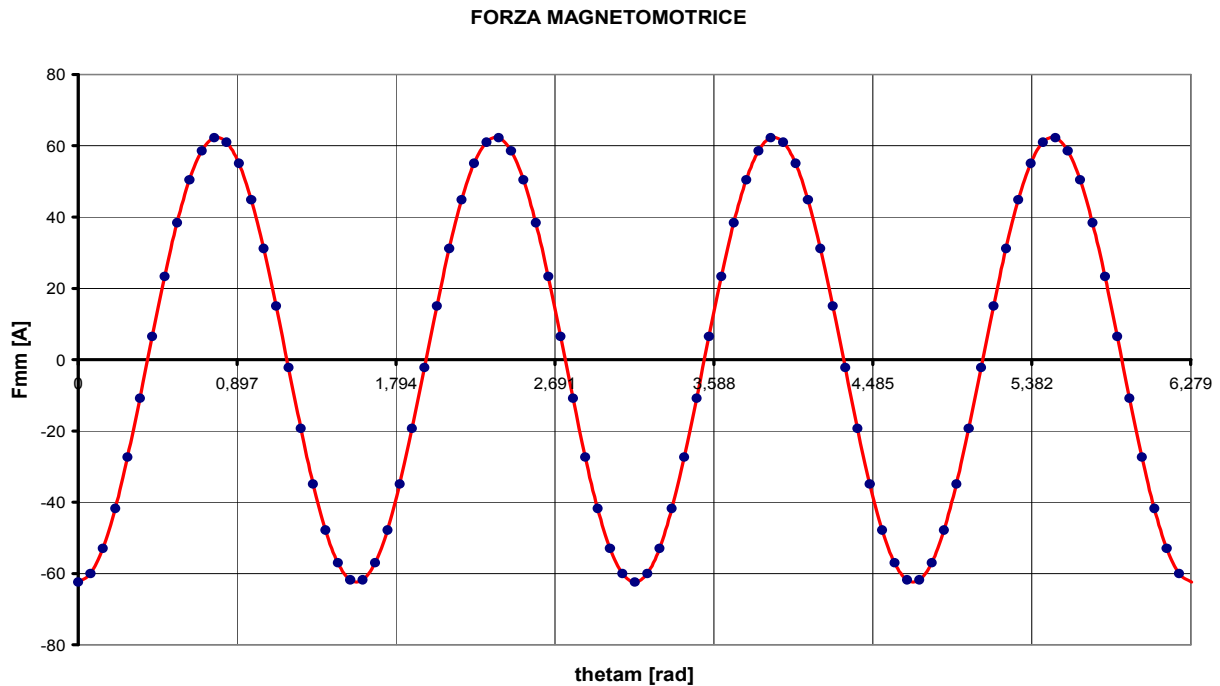


Fig. 7.21: Forza magnetomotrice in funzione di θ_m in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Grafico della coppia

Si riporta qui di seguito il grafico della coppia agente sul rotore in funzione dell'angolo meccanico θ_m , ottenuta mediante simulazione con software FEMM applicando il metodo del tensore degli sforzi di Maxwell.

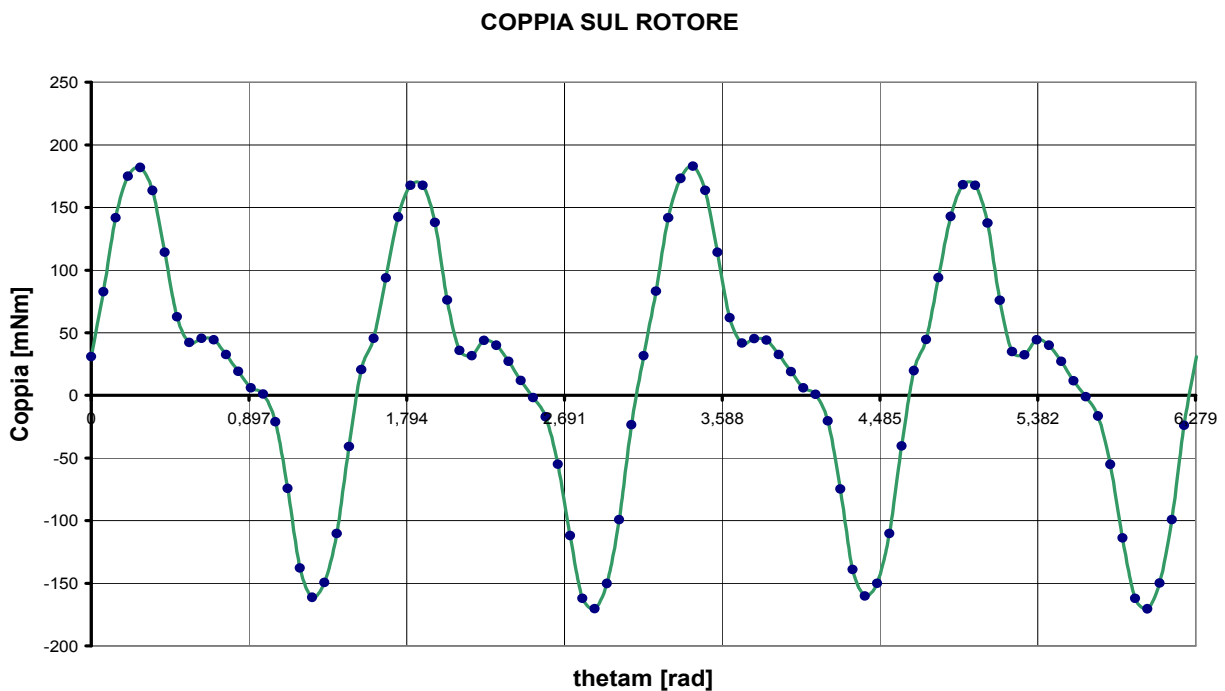


Fig. 7.22: Coppia sul rotore in funzione di θ_m in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Grafico dell' energia magnetica

Nella seguente figura viene riportata la forma d' onda dell' energia magnetica complessivamente messa in gioco al variare della posizione angolare del rotore del generatore a magnete permanente funzionante a carico in regime sinusoidale:

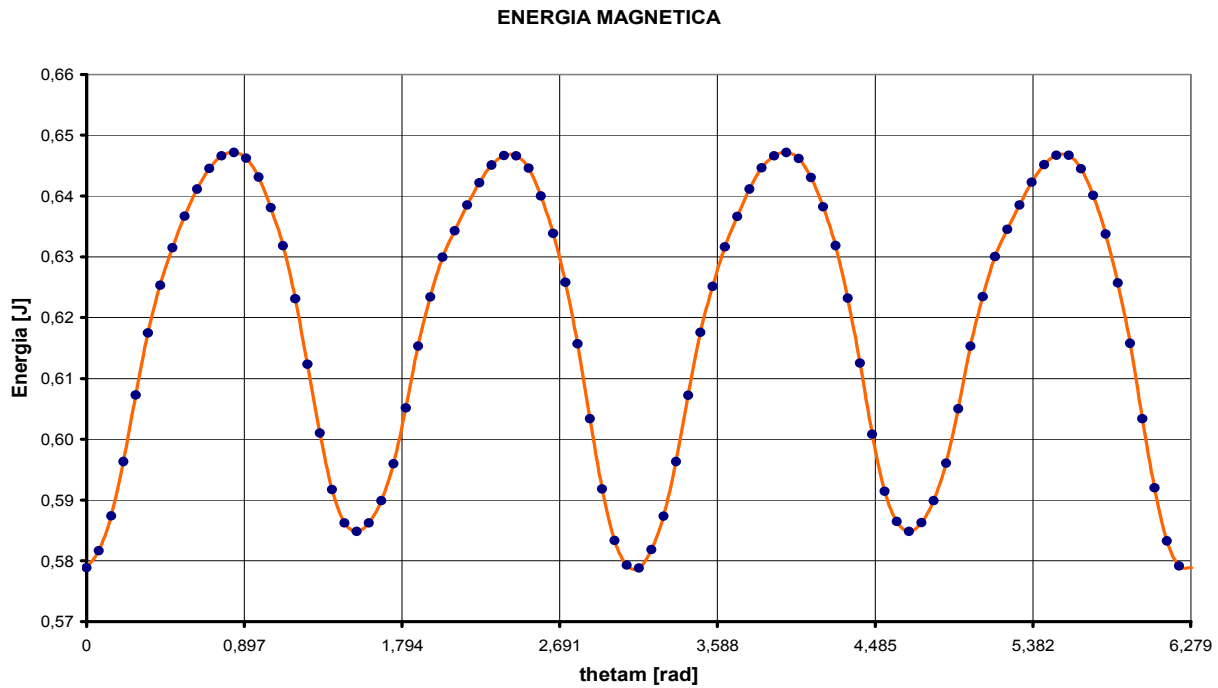


Fig. 7.23: Energia magnetica in funzione di θ_m in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Grafico della coenergia magnetica

Insieme all' energia viene riportata nella sottostante figura l' andamento grafico della coenergia magnetica, ottenuto per simulazioni successive per diversi valori dell' angolo meccanico θ_m mediante software FEMM:

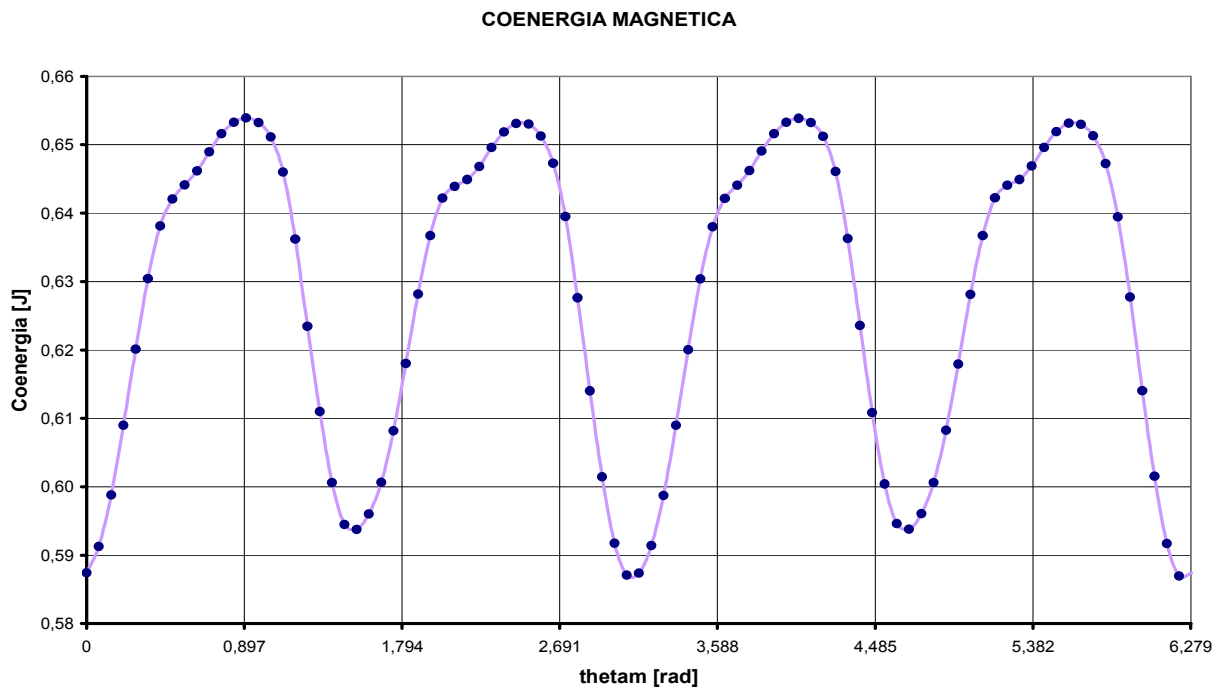


Fig. 7.24: Coenergia magnetica in funzione di θ_m in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Forza elettromotrice indotta

Al fine di stimare l' ampiezza della forza elettromotrice generata dal generatore a magnete permanente bipolare funzionante a carico in regime sinusoidale si è proceduto alla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore quando questi sono percorsi dalla corrente di carico.

Mediante il solito script in codice MATLAB è stato possibile determinare ampiezza e fase di tutte le principale armoniche che costituiscono il flusso $\Phi_c(\theta_m)$, le quali sono state raccolte e riordinate nella tabella sottostante:

Tabella 7.2: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ in regime sinusoidale

ARMONICA DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Fk [Wb]	Øk [rad]
1	-0,0028	-0,0248	0,0177	-1,459
2	0,0001	0,0000	0	-0,421
3	-0,0002	-0,0001	0,0002	-0,579
4	-0,0001	-0,0003	0,0002	-1,222
5	-0,0001	0,0000	0,0001	0,164

Il valore efficace del flusso concatenato, il fattore di distorsione ed il Total Harmonic Distortion sono risultati rispettivamente pari ai seguenti valori:

$$F = 1.77 \cdot 10^{-2} \quad [Wb]$$

$$F_{dis} = 1.01 \cdot 10^{-3} \quad [Wb]$$

$$THD = 3.65\%$$

Lo sviluppo in serie di Fourier del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ viene riportato nella seguente Fig.7.25, nella quale si possono osservare le ampiezze delle singole armoniche; in particolare è opportuno soffermarsi sull' armonica fondamentale, poichè da essa dipende l' ampiezza della tensione generata dal generatore bipolare funzionante nelle condizioni di carico ipotizzate.

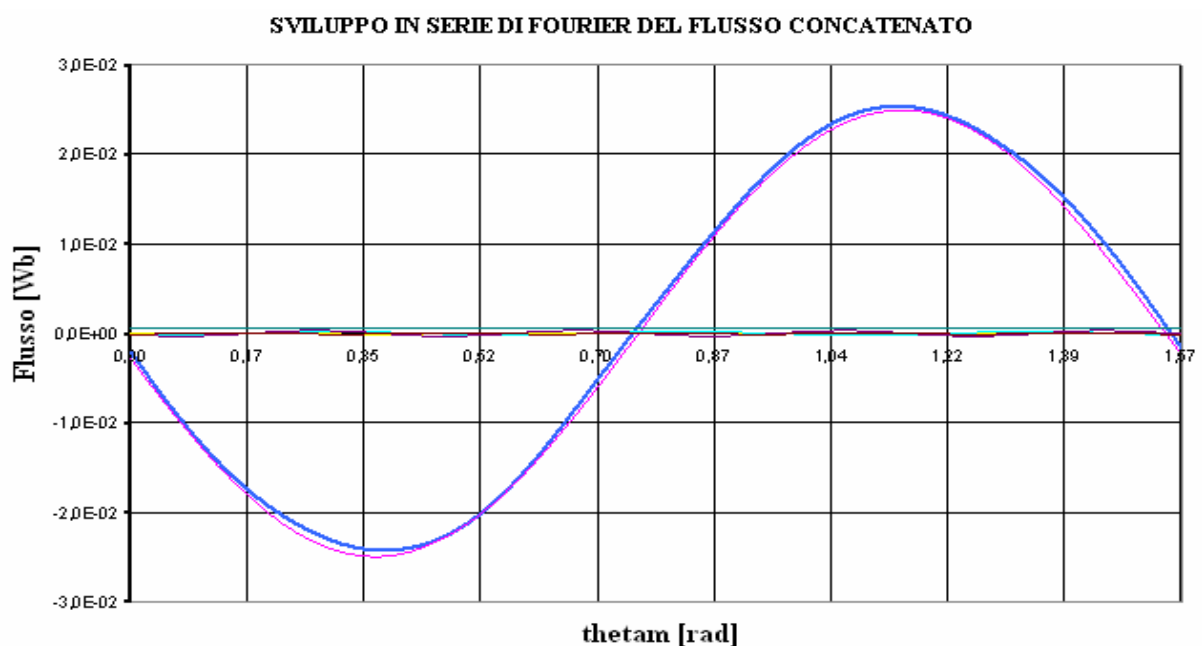


Fig. 7.25: Sviluppo in serie di Fourier del flusso concatenato in regime sinusoidale

Una volta eseguito lo sviluppo in serie di Fourier del flusso concatenato si è proceduto alla ricostruzione della forma d' onda della tensione generata dal generatore applicando la nota espressione (2.15) ovvero:

$$\Phi_c(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)]$$

Il grafico in funzione dell' angolo meccanico θ_m della forza elettromotrice generata a carico in regime sinusoidale viene riportata nella figura qui di seguito:

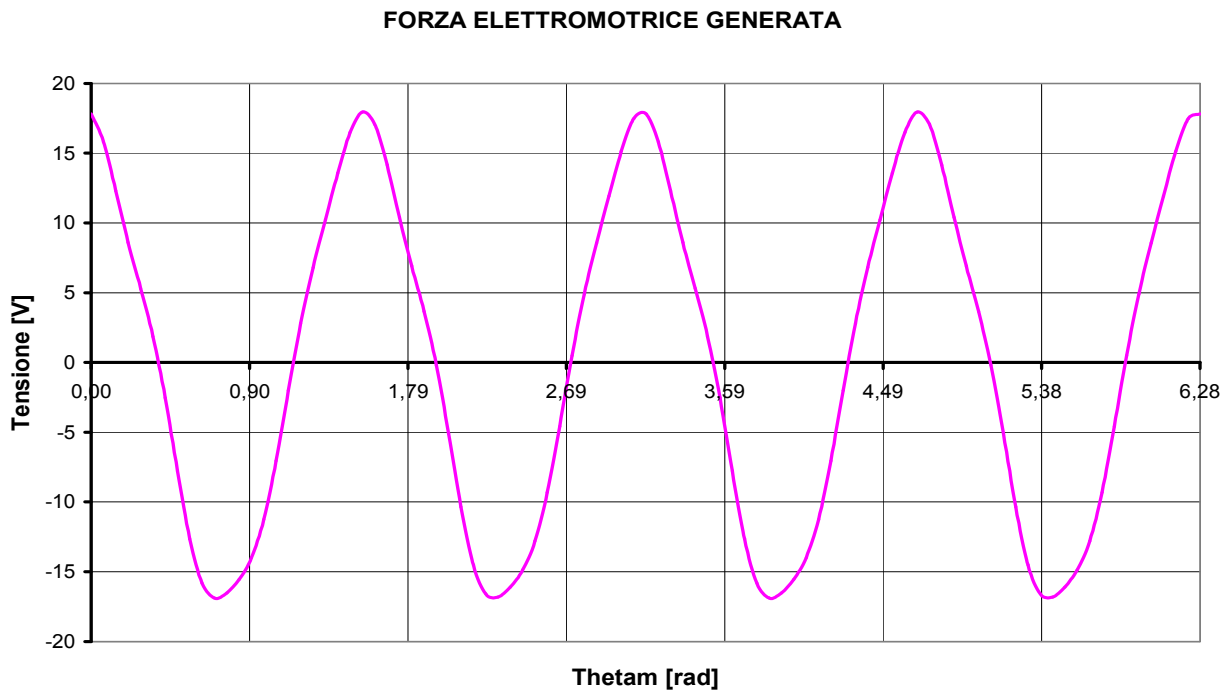


Fig. 7.26: Forza elettromotrice generata per $\omega_m = 170$ [rad/s] in regime sinusoidale

7.3 SIMULAZIONE A CARICO IN REGIME CONTINUO

L'ultima categoria di simulazioni eseguite con il software FEMM sul generatore bipolare progettato riguardano l'analisi dello stesso quando alimenta un carico puramente resistivo tramite convertitore AC/DC monofase a presa centrale; si è dunque considerato un carico resistivo di resistenza elettrica pari a $55 \text{ } [\Omega]$ e per semplicità si è ipotizzato durante il processo di analisi che la corrente che attraversa gli avvolgimenti di statore sia continua, anche se in realtà sappiamo essere a dente di sega. L'intensità di corrente elettrica che attraversa il carico dovrà essere quindi pari a:

$$I_R = \frac{E_0}{R} = \frac{8.43}{55} = 0.153 \text{ } [A]$$

Di conseguenza la forza magnetomotrice da essa generata negli avvolgimenti di statore risulterà pari al seguente valore:

$$M = 2 \cdot n_c \cdot I_R = 2 \cdot 200 \cdot 0.153 = 61.2 \text{ } [A]$$

Si riportano qui di seguito i grafici delle principali grandezze elettromagnetiche ottenuti dalle simulazioni mediante software FEMM ipotizzando che il generatore progettato eroghi una corrente continua di intensità pari a I_R .

Grafico del flusso concatenato

Nella sottostante figura viene riportato il grafico del flusso concatenato con gli avvolgimenti di statore nelle suddette condizioni di carico, ovvero funzionamento a regime continuo con carico puramente resistivo:

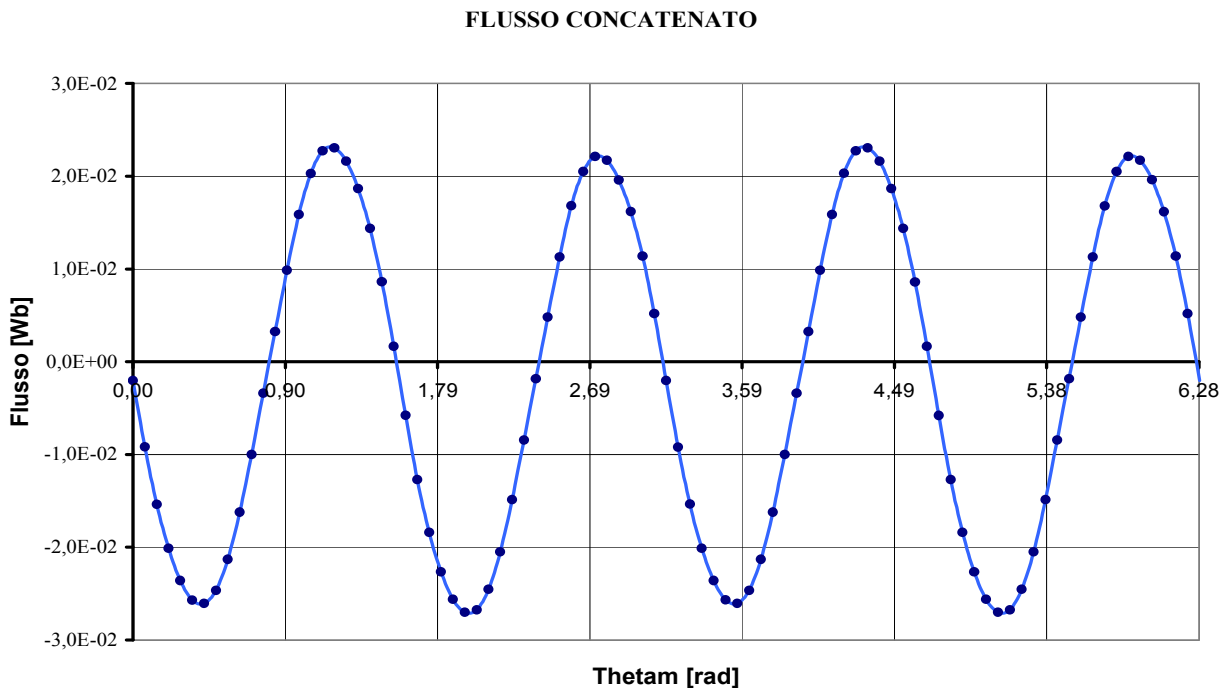


Fig. 7.27: Flusso concatenato in funzione di θ_m in regime continuo per $\omega_m = 170 \text{ } [\text{rad/s}]$

Osservando il grafico del flusso concatenato sopra riportato si può notare una forma d'onda tipicamente sinusoidale, il che dimostra che anche questo tipo di generatore a magnete permanente progettato è in grado di generare forza elettromotrice alternata caratterizzato da basso contenuto armonico, e quindi di buona qualità; il valore massimo del flusso $\Phi_c(\theta_m)$ ottenuto è risultato pari a:

$$\Lambda_c = 2.31 \cdot 10^{-2} \text{ } [Wb]$$

Valore molto prossimo al corrispondente valore di picco ottenuto a carico a regime continuo durante l'analisi del generatore a magnete permanente a quattro poli precedentemente costruito.

Grafico della coppia

Nella sottostante figura si può osservare l'andamento grafico della coppia agente sul rotore stimata mediante il metodo del tensore degli sforzi di Maxwell, si nota in particolare un andamento molto meno oscillante rispetto a quello del generatore a quattro poli ed una massima oscillazione di coppia notevolmente maggiore !

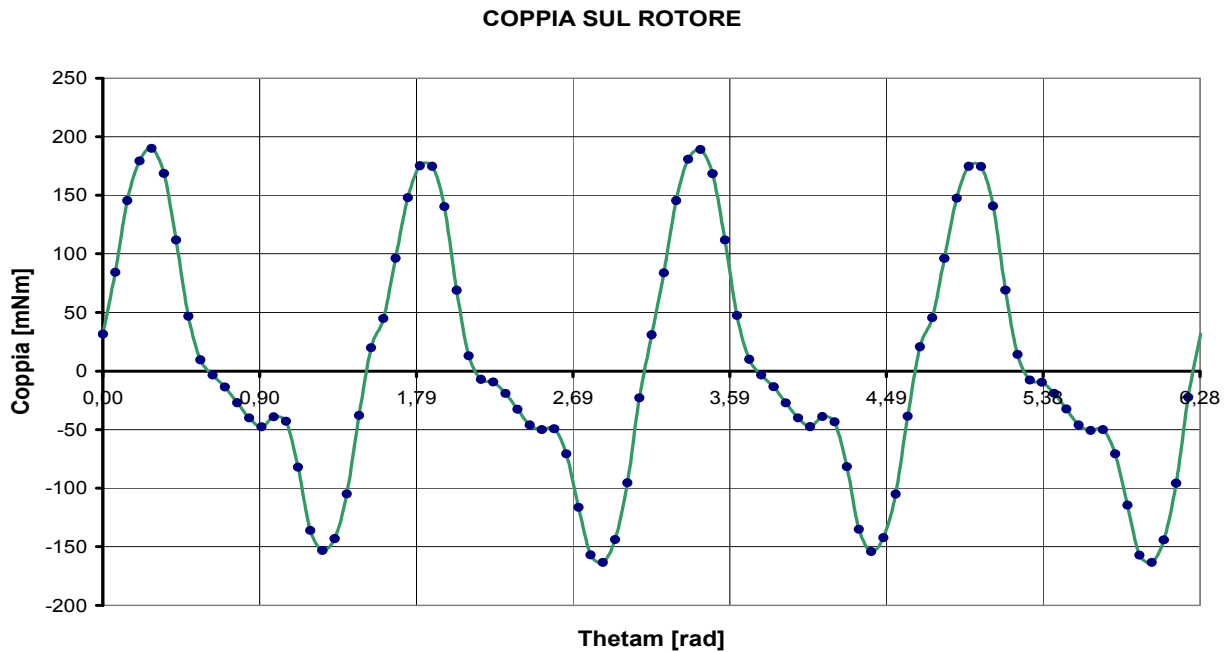


Fig. 7.28: Coppia sul rotore in funzione di θ_m in regime continuo per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Grafico dell'energia magnetica

Nella seguente Fig.7.29 viene riportato l'andamento grafico dell'energia magnetica in funzione dell'angolo meccanico θ_m , considerando il generatore erogante una corrente continua pari a I_R :

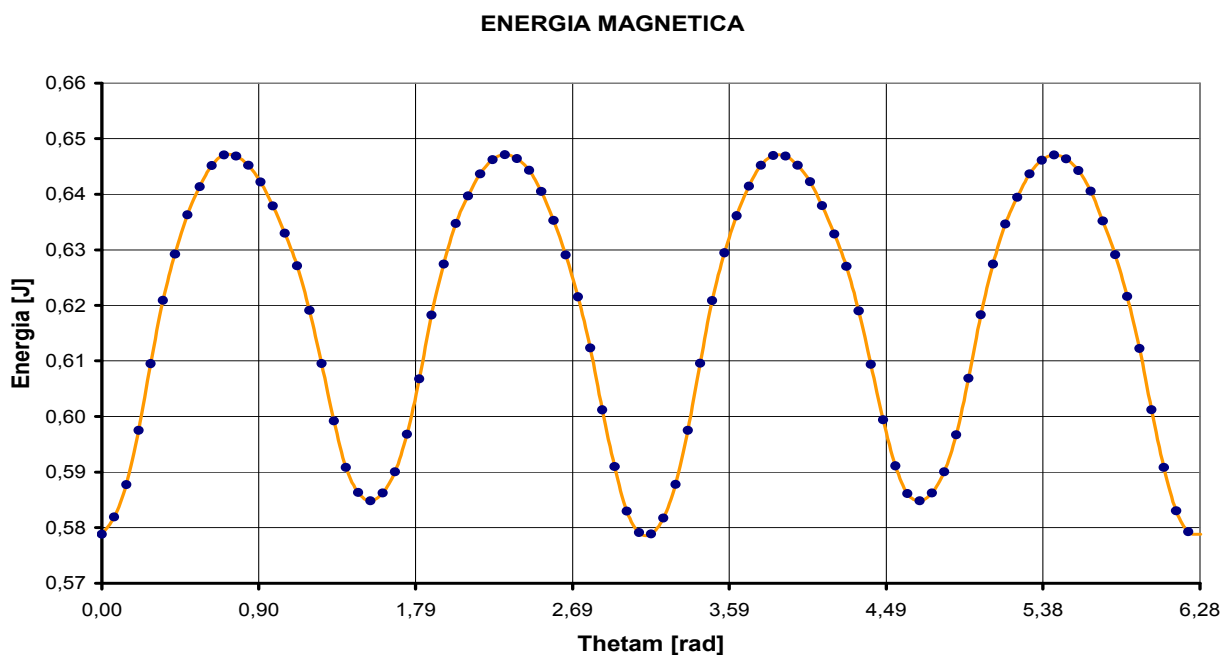


Fig. 7.29: Energia magnetica in funzione di θ_m in regime continuo per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Grafico della coenergia magnetica

Insieme all' energia viene riportata nella sottostante figura l' andamento grafico della coenergia magnetica, ottenuto per simulazioni successive per diversi valori dell' angolo meccanico θ_m mediante software FEMM:

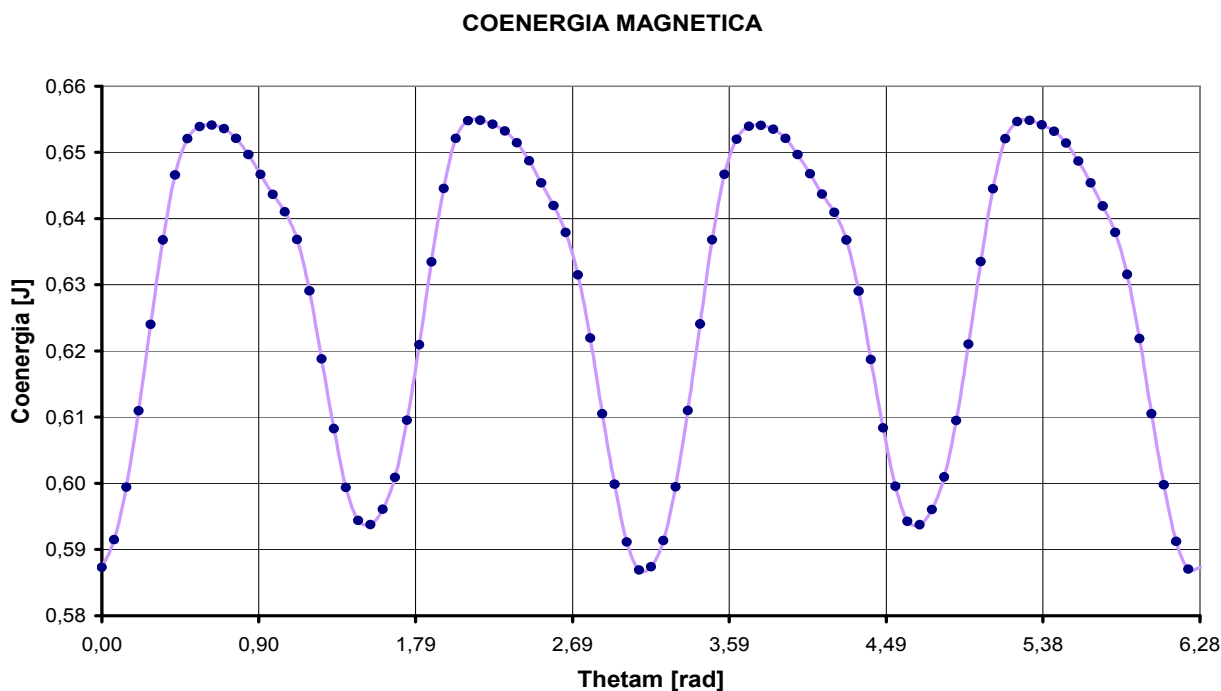


Fig. 7.30: Coenergia magnetica in funzione di θ_m in regime continuo per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Forza elettromotrice indotta

Per poter tracciare l' andamento grafico della forza elettromotrice generata dal generatore a magnete permanente ottenuta mediante simulazione con FEMM si è proceduto prima alla scomposizione in serie di Fourier del flusso concatenato, al fine di determinare ampiezza e fase dell' armonica fondamentale.

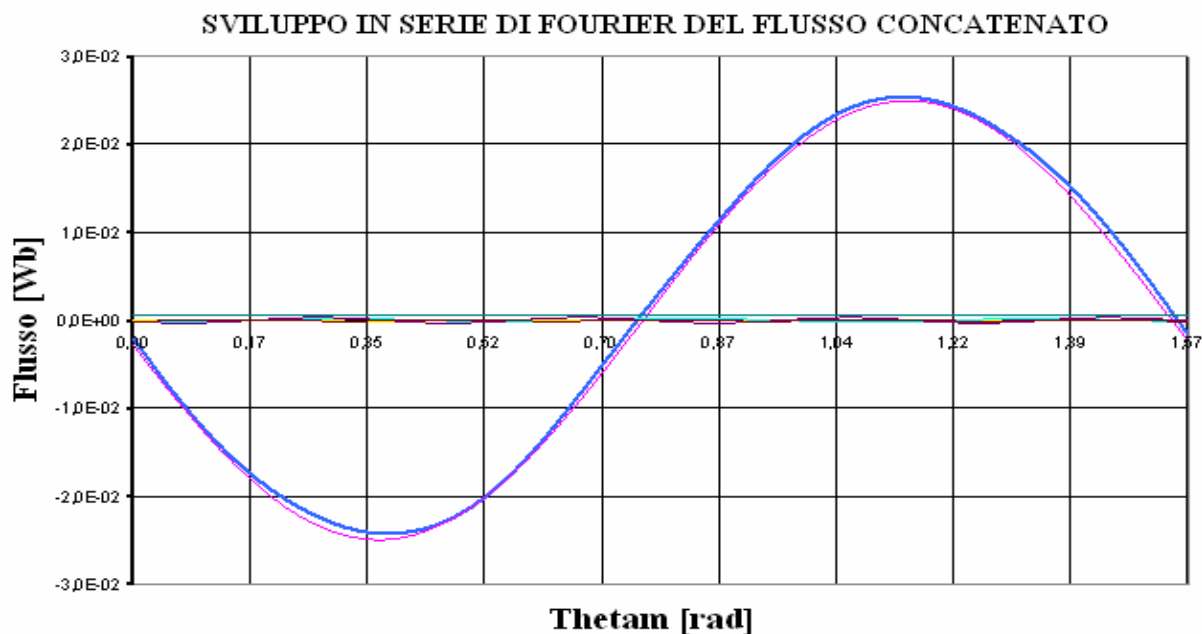


Fig. 7.31: Sviluppo in serie di Fourier del flusso concatenato in regime continuo

I valori efficaci e le fasi delle singole armoniche che compongono il flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ sono state raccolte e ordinate nella sottostante tabella, dove per ogni armonica vengono riportate le componenti a_k e b_k , il valore efficace F_k ed il corrispondente valore della fase.

Tabella 7.3: Armoniche del flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$ in regime continuo

ORDINE DI ARMONICITA'	ak [Wb]	bk [Wb]	Fk [Wb]	Phase [rad]
1	-2,30E-03	-2,44E-02	1,74E-02	-1,478
2	-5,00E-04	8,00E-04	7,00E-04	0,977
3	-3,00E-04	2,00E-04	3,00E-04	0,551
4	-4,00E-04	0	3,00E-04	0,004
5	-3,00E-04	2,00E-04	3,00E-04	0,617

Il valore efficace del flusso concatenato, il fattore di distorsione ed il Total Harmonic Distortion sono risultati rispettivamente pari ai seguenti valori:

$$F = 1.88 \cdot 10^{-2} \quad [Wb]$$

$$Fdis = 1.03 \cdot 10^{-3} \quad [Wb]$$

$$THD = 3.71\%$$

Una volta determinato il valore efficace delle armoniche fondamentale è stato immediato tracciare la forma d'onda della forza elettromotrice generata nelle suddette condizioni di carico, ovvero mediante foglio elettronico EXCEL sono stati assegnati una serie di valori all'angolo meccanico θ_m e successivamente introdotti nella seguente equazione:

$$\Phi_c(t) = F_0 + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \cos(k\omega t) + b_k \sin(k\omega t)]$$

Il grafico della tensione indotta ottenuta al variare della posizione del rotore del generatore bipolare progettato è stata riportata nella figura qui di seguito:

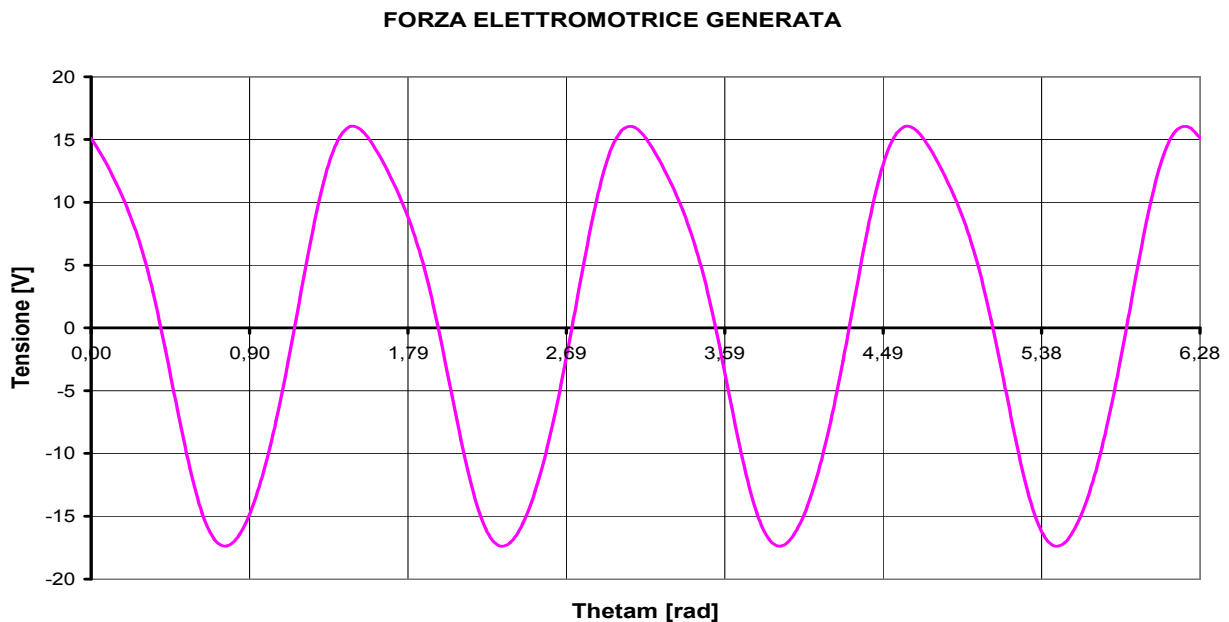


Fig. 7.32: Forza elettromotrice generata per $\omega_m = 170$ [rad/s] in continuo

7.4 CONSIDERAZIONI SUL MODELLO PROGETTATO

Dopo aver analizzato il comportamento del generatore a magneti permanente bipolare mediante software di simulazione FEMM si è ritenuto opportuno esprimere una valutazione generale sui risultati ottenuti; in particolare si sono confrontati i valori e gli andamenti grafici dei parametri elettromeccanici caratteristici del generatore bipolare progettato con quelli del generatore a quattro poli precedentemente costruito, sia per quanto riguarda il funzionamento a vuoto sia per quanto riguarda il funzionamento in regime sinusoidale con carico resistivo di resistenza pari a 100 $[\Omega]$.

Considerazioni sul flusso concatenato $\Phi_c(\theta_m)$

Si pongano ora a confronto gli andamenti grafici dei flussi concatenati con gli avvolgimenti di statore dei due tipi di generatore a magneti permanente ottenuti dalle simulazioni mediante l'ausilio del software FEMM:

Si consideri la Fig.7.10 nella quale viene riportata la forma d'onda di $\Phi_c(\theta_m)$ del generatore a due poli progettato quando funziona a vuoto, il valore massimo ottenuto è risultato pari a:

$$\Lambda_c = 2.48 \cdot 10^{-2} \quad [Wb]$$

Si ponga ora attenzione alla Fig.7.20 nella quale viene riportato il grafico del flusso concatenato del generatore bipolare a carico in regime sinusoidale, il valore di picco è risultato pari a:

$$\Lambda_c = 2.53 \cdot 10^{-2} \quad [Wb]$$

In entrambi i casi il valore di picco ottenuto risulta maggiore rispetto al corrispondente valore massimo di flusso concatenato del generatore a quattro poli ottenuto a vuoto ($\Lambda_c = 2.36 \cdot 10^{-2}$ [Wb]) e di quello ottenuto a carico in regime sinusoidale ($\Lambda_c = 2.40 \cdot 10^{-2}$ [Wb]).

Essendo l'ampiezza della forma d'onda del flusso concatenato del generatore a magneti permanente bipolare maggiore, risulterà leggermente maggiore anche la forza elettromotrice generata.

Considerazioni sulla coppia

Nella Fig.7.11 viene riportato l'andamento grafico della coppia agente sul rotore del generatore bipolare progettato quando funziona a vuoto, il valore medio di coppia ottenuto è risultato pari a:

$$T_m = -2.5 \quad [mNm]$$

Mentre la massima oscillazione di coppia ottenuta è risultata pari al seguente valore:

$$\Delta T = 333 \quad [mNm]$$

Il valore medio della coppia a vuoto ottenuta dal generatore a quattro poli precedentemente costruito era risultata pari a $1.62 \cdot 10^{-2}$ [Nm] (quindi circa 11 volte minore) mentre la corrispondente oscillazione massima di coppia era risultata pari a $3.12 \cdot 10^{-2}$ (anch'essa 11 volte minore).

Si consideri ora la forma d'onda della coppia in funzione di θ_m a carico in regime sinusoidale riportata in Fig.7.22, il valore medio di coppia ottenuto è risultato pari a:

$$T_m = 7.5 \quad [mNm]$$

Per quanto riguarda la massima oscillazione di coppia essa è risultata pari a:

$$\Delta T = 342 \quad [mNm]$$

Anche nel funzionamento a carico in regime sinusoidale sono stati riscontrati valori di T_{max} e ΔT circa 11 volte superiori rispetto a quelli ottenuti dalle simulazioni nelle stesse condizioni di carico effettuate sul generatore a magneti permanente a quattro poli.

Il modello di generatore bipolare progettato risulta dunque soggetto ad impuntamento molto elevato, il che è un aspetto negativo poichè a parità di tensione generata il generatore migliore risulta essere quello caratterizzato da un valore di oscillazione di coppia ΔT il minore possibile.

Considerazioni sulla forza elettromotrice generata

Confrontando i grafici delle tensioni generate dai due modelli di generatore a magnete permanente sia a vuoto sia a carico in regime sinusoidale si riscontra un' ampiezza della forma d' onda pressochè uguale; a dire il vero osservando attentamente le curve di tensione caratteristiche del generatore bipolare si nota un valore massimo della tensione generata leggermente superiore, circa 0.2 [V] in più.

Considerazioni sull' energia e la coenergia magnetica

I grafici dell' energia e della coenergia magnetica caratteristici del generatore a magnete permanente bipolare progettato presentano sia a vuoto sia a carico in regime sinusoidale circa gli stessi valori dei corrispondenti grafici appartenenti al modello di generatore a quattro poli costruito, tuttavia le forme d' onda risultano tra di loro quasi perfettamente sovrapponibili.

Questo fa supporre che il circuito magnetico del generatore bipolare progettato tenda, a parità di condizioni di funzionamento, a saturare meno rispetto a quello del generatore a quattro poli costruito.

7.5 COSTRUZIONE DEL GENERATORE BIPOLARE

Dopo aver eseguito tutte le simulazioni sul modello di generatore progettato si è proceduto alla costruzione dello stesso, con gli stessi materiali e le stesse modalità con le quali è stato costruito il precedente generatore a quattro poli.

Per costruire il nucleo ferromagnetico di statore sono stati impiegati 57 lamierini di spessore pari a 0.35 [mm], gli stessi utilizzati precedentemente per la costruzione del modello di generatore quadripolare; una volta fissato il pacco mediante tiranti imbullonati si è provveduto alla rimozione dei due denti di statore semplicemente tagliandoli con seghetto da ferro.

Nella sottostante figura viene riportata la foto del nucleo ferromagnetico del generatore bipolare in fase di costruzione, una volta rimossi i denti di statore dal pacco di lamierini imbullonato.

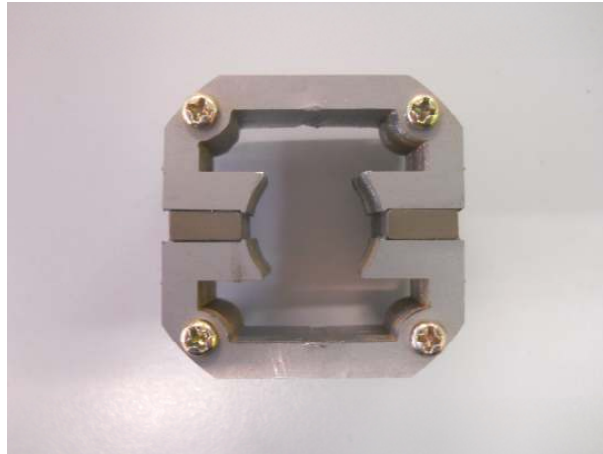


Fig. 7.33: Nucleo ferromagnetico del generatore a due poli

Una volta costruito il circuito ferromagnetico si è proceduto alla costruzione degli avvolgimenti di statore, per i quali è stato impiegato lo stesso filo di rame di diametro pari a 0.25 [mm] usato per la realizzazione degli avvolgimenti del generatore a quattro poli.

Terminata l'avvolgitura del filo di rame sul supporto metallico di alluminio si è proceduto alla nastratura degli stessi al fine di garantire il massimo isolamento con il nucleo magnetico di statore; nella sottostante figura si possono vedere gli avvolgimenti nastrati ed introdotti nel nucleo del generatore bipolare in fase di costruzione:

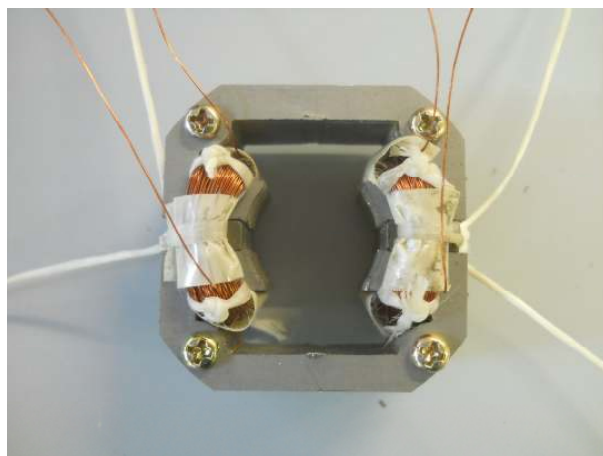


Fig. 7.34: Statore del generatore a due poli

Terminata la costruzione dello statore si è proceduto alla realizzazione del rotore con gli stessi lamierini sagomati utilizzati per costruire il rotore del generatore a quattro poli.

Fatto ciò si è proceduto all' inserimento del rotore nello statore e al fissaggio della carcassa metallica; si specifica che l' albero rotorico, i cuscinetti e la carcassa stessa sono stati prelevati dal generatore costruito in precedenza, poichè non vi era la possibilità di procurarne una copia in tempi ragionevoli.

Nella sottostante Fig.7.34 viene riportata la foto raffigurante il nuovo generatore a due poli costruito, come si può notare da un punto di vista estetico è del tutto somigliante a quello precedente.

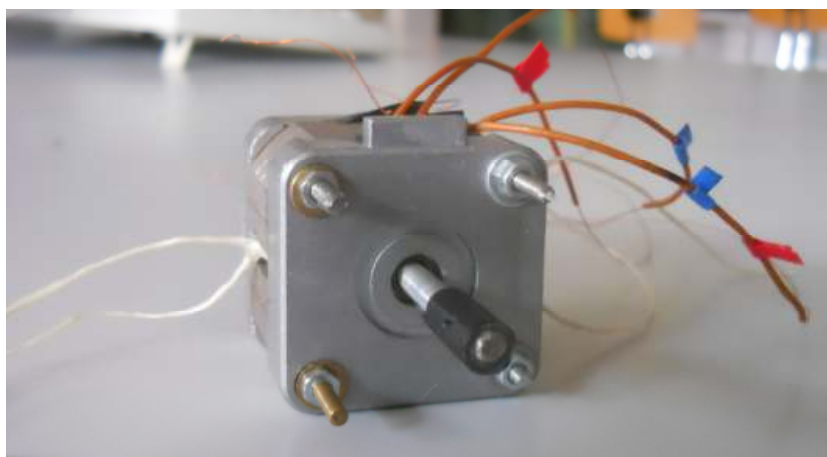


Fig. 7.35: Generatore a magnete permanente bipolare

7.6 MISURE DI TENSIONE

Dopo aver costruito il generatore bipolare a magnete permanente sono state eseguite le stesse misurazioni di tensione e di coppia nelle diverse condizioni di carico eseguite sul generatore a quattro poli; in particolare per quanto riguarda le misurazioni di tensione sono state eseguite:

- 1 - Misura di tensione a vuoto
- 2 - Misura di tensione a carico in regime sinusoidale
- 3 - Misura di tensione a carico con raddrizzato in regime continuo

7.6.1 MISURA DELLA FORZA ELETTRICITRICE A VUOTO

Il circuito di prova utilizzato per la misura della tensione a vuoto generata dal generatore bipolare è lo stesso usato per la visualizzazione della tensione generata a vuoto dal generatore a quattro poli costruito in precedenza, se ne riporta una rapida descrizione per fornire al lettore un promemoria: mediante alimentatore stabilizzato si alimenta il motore DC a magnete permanente, il quale trasmette la potenza meccanica al rotore del generatore a due poli essendo connessi tramite giunto meccanico; dopodichè i due terminali d'uscita degli avvolgimenti di statore collegati in serie vengono connessi mediante sonda all'ingresso del primo canale dell'oscilloscopio digitale, in modo tale da poter visualizzare la forma d'onda della tensione generata.

Nella sottostante figura ne viene riportato l'andamento grafico in funzione del tempo rielaborato mediante foglio elettronico EXCEL:

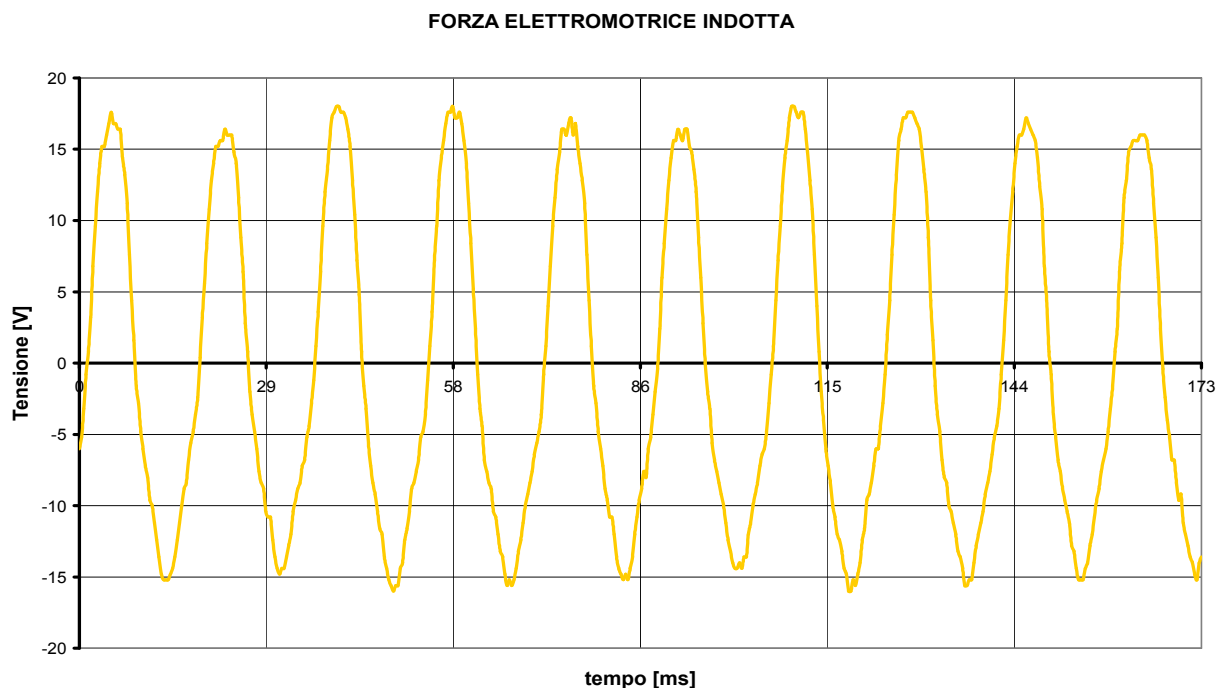


Fig. 7.36: Tensione generata a vuoto dal generatore bipolare per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Osservando la Fig.7.36 si nota una forma d'onda molto prossima a quella sinusoidale, pur non essendo perfettamente regolare; il valore di picco è risultato pari a:

$$\hat{E}_0 = 17.62 \quad [V]$$

Il periodo della forza elettromotrice visualizzata tramite oscilloscopio digitale è risultato pari a:

$$T = 18.56 \quad [ms]$$

Pertanto il corrispondente valore di frequenza risulterà pari al suo inverso, ovvero:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{18.56 \cdot 10^{-3}} = 53.86 \quad [Hz]$$

Di conseguenza la corrispondente pulsazione elettrica risulta pari al seguente valore:

$$\omega_e = 2\pi f = 2 \cdot \pi \cdot 53.86 = 338.53 \quad [rad/s]$$

Per effettuare una rapida verifica sulla correttezza del valore di frequenza elettrica ottenuto si consideri la velocità angolare meccanica del motore DC connesso al generatore misurata mediante tachimetro elettronico, essa è risultata circa pari a:

$$\omega_m = 170 \quad [rad/s]$$

Quindi il valore della pulsazione elettrica della forza elettromotrice generata deve essere pari a:

$$\omega_e = 2p \cdot \omega_m = 2 \cdot 170 = 340 \quad [rad/s]$$

Il quale è molto prossimo al valore della pulsazione elettrica ricavata dalla forma d'onda della tensione visualizzata mediante oscilloscopio digitale, pertanto il valore di frequenza stimato è corretto !

Per determinare il valore efficace della forza elettromotrice generata e stimarne il contenuto armonico è stata eseguita la scomposizione in serie di Fourier della forma d'onda di Fig.7.36, il risultato ottenuto viene riportato nella figura sottostante:

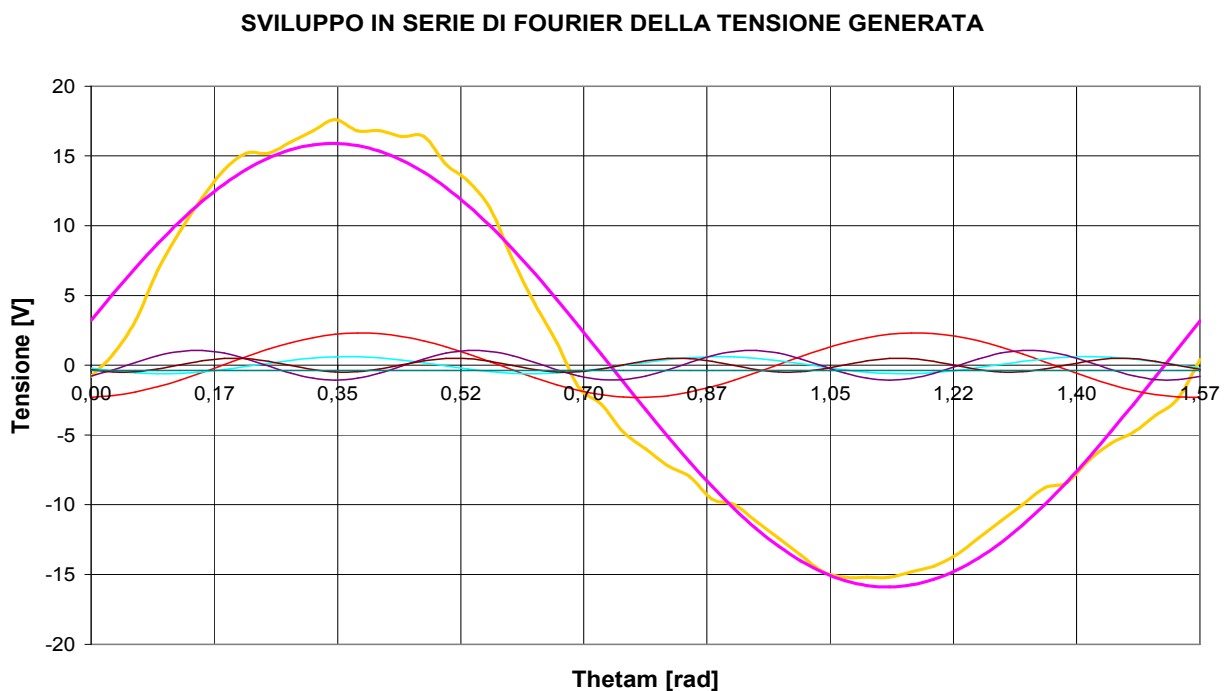


Fig. 7.37: Sviluppo in serie di Fourier della tensione a vuoto per $\omega_m = 170 \quad [rad/s]$

Grazie alla scomposizione in serie di Fourier eseguita mediante script in codice MATLAB è stato possibile determinare l'ampiezza della prima armonica, la quale è risultata pari a:

$$\hat{V}_1 = 15.89 \quad [V]$$

Pertanto il valore efficace dell'armonica fondamentale risulterà pari a:

$$V_1 = \frac{\hat{V}_1}{\sqrt{2}} = \frac{15.89}{\sqrt{2}} = 11.24 \quad [V]$$

Per quanto riguarda il grado di distorsione della forma d'onda della forza elettromotrice generata è evidente che il suo contenuto armonico risulterà più elevato rispetto a quello della tensione generata dal generatore a quattro poli; il Total Harmonic Distortion è risultato pari al seguente valore:

$$THD = 17.08\%$$

7.6.2 MISURA DELLA TENSIONE A CARICO IN REGIME SINUSOIDALE

Il circuito impiegato per la misura della tensione applicata ad un carico resistivo tramite il generatore bipolare costruito risulta del tutto analogo a quello utilizzato per l'esecuzione della prova a vuoto, con la sola differenza che i terminali della sonda dell'oscilloscopio digitale sono connessi ai capi di un resistore di resistenza pari a 100 $[\Omega]$.

Tramite alimentatore stabilizzato si è alimentato il motore DC connesso meccanicamente al rotore del generatore mediante tensione gradualmente crescente, fino a raggiungere la massima velocità di rotazione risultata pari a circa 170 $[\text{rad/s}]$.

La forma d'onda della tensione ai capi del carico resistivo visualizzata mediante oscilloscopio digitale e rielaborata tramite foglio elettronico EXCEL viene qui di seguito riportata:

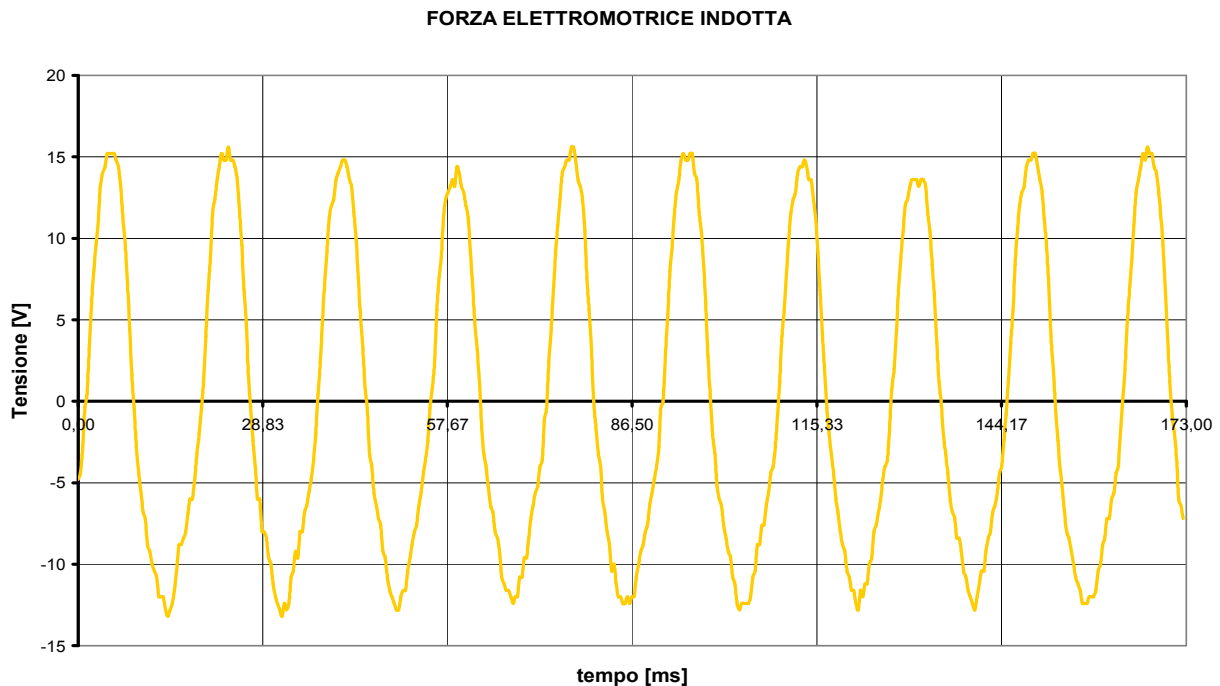


Fig. 7.38: Tensione applicata al carico resistivo in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ $[\text{rad/s}]$

L'andamento grafico della tensione sul carico è esattamente uguale a quello della forza elettromotrice generata a vuoto ma con un valore di picco leggermente minore, questo a causa delle cadute di tensione sulle impedenze interne caratteristiche degli avvolgimenti di statore.

Il valore di picco della tensione ai capi del carico ricavato dal grafico di Fig.7.38 è risultato pari al seguente valore:

$$\hat{V}_R = 15.21 \quad [\text{V}]$$

Pertanto il massimo valore di corrente che attraversa la resistenza R alla quale è applicata la tensione generata dal generatore bipolare a magnete permanente costruito risulterà pari a:

$$\hat{I}_R = \frac{\hat{V}_R}{R} = \frac{15.21}{100} = 0.152 \quad [\text{A}]$$

Al fine di determinare i corrispondenti valori efficaci è stata eseguita la scomposizione in serie di Fourier della forma d'onda della tensione di Fig.7.38, il contenuto armonico ottenuto dall'implementazione dello script in codice MATLAB viene riportato qui di seguito:

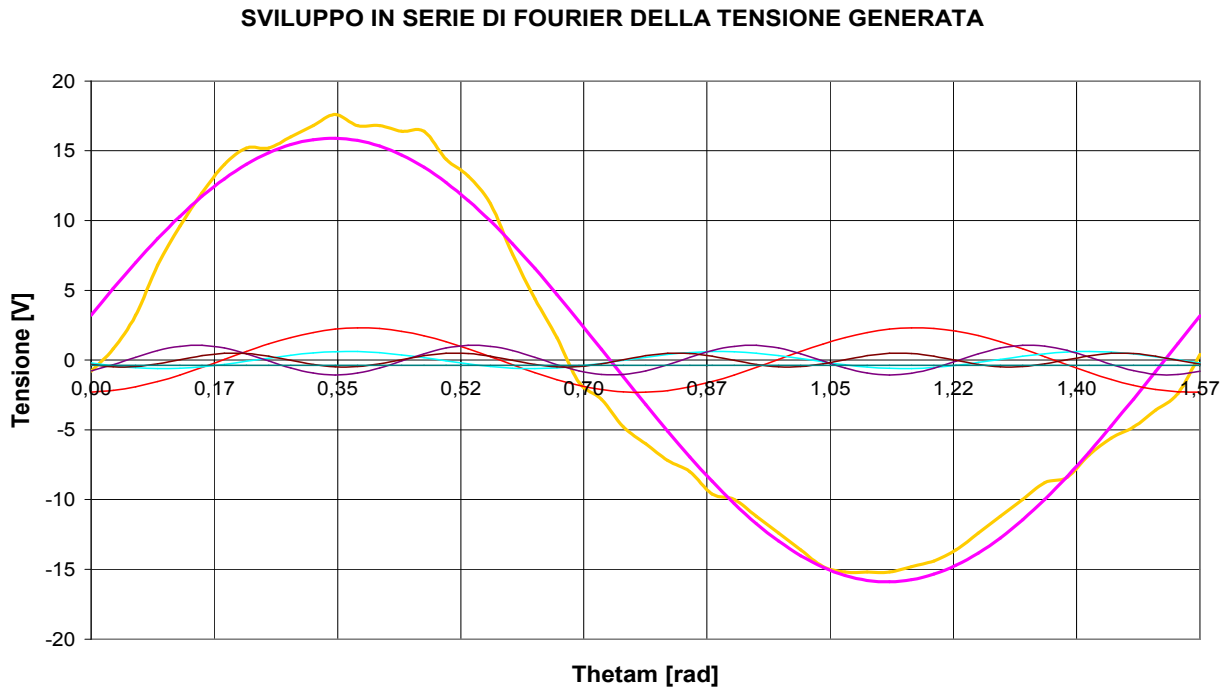


Fig. 7.39: Sviluppo in serie di Fourier della tensione sul carico per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Dal grafico riportato nella precedente figura è stato determinato il valore efficace dell'armonica fondamentale caratteristica della tensione sul carico, il quale è risultato pari a:

$$V_{1R} = \frac{\hat{V}_{1R}}{\sqrt{2}} = \frac{13.57}{\sqrt{2}} = 9.595 \quad [V]$$

Il total Harmonic Distortion, ovvero il parametro che permette di stimare il grado di distorsione armonica della tensione rilevata, è risultato pari a:

$$THD = 22.37\%$$

Infine il valore efficace della corrente che attraversa il carico resistivo di resistenza R , e quindi il valore efficace della corrente che percorre gli avvolgimenti di statore connessi in serie, è risultata pari a:

$$I_{1R} = \frac{V_{1R}}{R} = \frac{9.595}{100} = 0.096 \quad [A]$$

Valore notevolmente inferiore alla corrente nominale del filo di rame con cui sono stati costruiti gli avvolgimenti di statore, valore pari a 500 [mA].

7.6.2 MISURA DELLA TENSIONE A CARICO CON CONVERTITORE AC/DC

Infine si è ritenuto opportuno eseguire la misurazione della tensione applicata ad un carico resistivo mediante il convertitore AC/DC monofase a presa centrale progettato e realizzato in precedenza.

Così come nella misurazione della tensione in regime continuo del generatore a quattro poli è stato scelto come carico un resistore di resistenza pari a 1000 [Ω].

Mediante l'alimentatore stabilizzato si è alimentato con tensione gradualmente crescente il motore DC a magnete permanente connesso mediante giunto meccanico all'albero del generatore bipolare, fino a raggiungere la massima velocità di rotazione pari a 170 [rad/s].

Nella sottostante figura viene riportato l'andamento della tensione in uscita dal raddrizzatore rilevata mediante oscilloscopio digitale e successivamente rielaborata tramite foglio elettronico EXCEL:

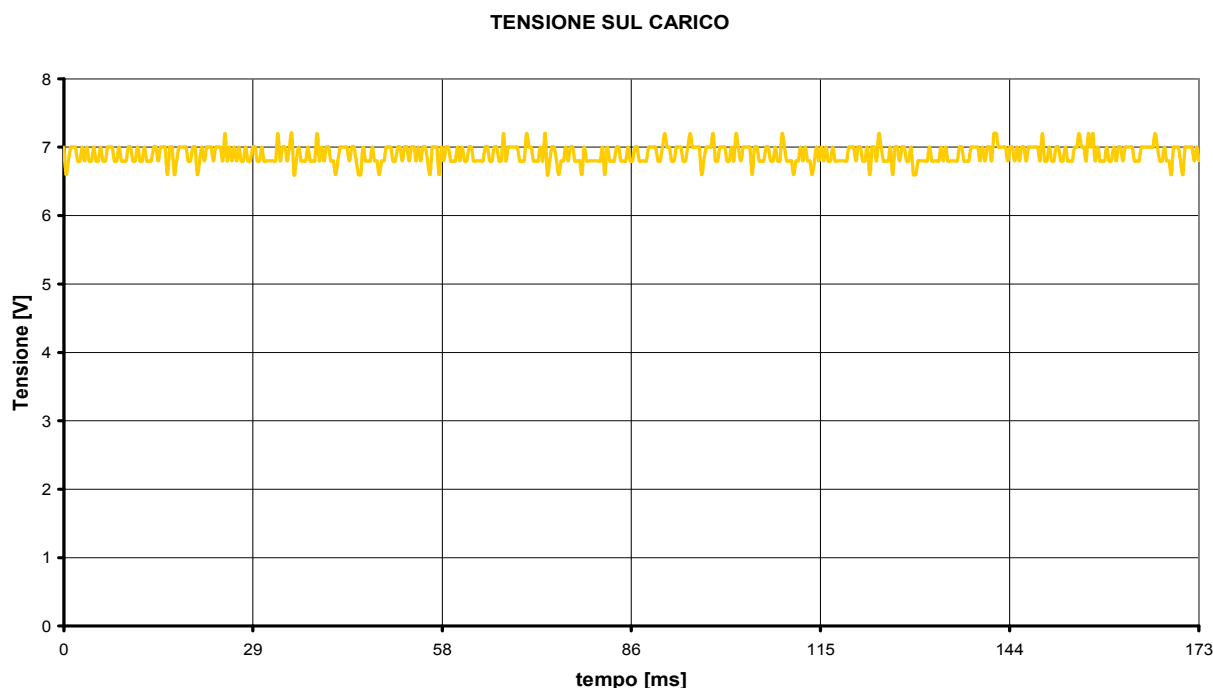


Fig. 7.40: Tensione in uscita dal convertitore AC/DC per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Come si può vedere in Fig.7.40 la tensione ai capi della resistenza di carico è pressoché continua e di ampiezza pari al seguente valore:

$$V_R = 7 \text{ [V]}$$

La massima oscillazione della tensione d'uscita è risultata pari a:

$$\Delta V = V_{Rmax} - V_{Rmin} = 7.2 - 6.8 = 0.4 \text{ [V]}$$

Mentre l'intensità della corrente continua che attraversa il carico resistivo R risulta pari a:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{7}{1000} = 7 \text{ [mA]}$$

Con una corrente di così bassa intensità le cadute di tensione sulle impedenze interne degli avvolgimenti di statore sono praticamente trascurabili !

7.7 MISURE DI COPPIA

Una volta ultimate le misurazioni di tensione nelle differenti condizioni di carico si è proceduto ad effettuare le misurazioni di coppia sul generatore bipolare costruito, al fine di verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti mediante software di simulazione FEMM.

7.7.1 MISURA DI COPPIA A VUOTO

Per prima cosa è stata eseguita la misurazione della coppia agente sul rotore del generatore a magnete permanente in assenza di carico elettrico; il circuito montato per la prova è esattamente lo stesso impiegato per la misurazione della coppia a vuoto del generatore a quattro poli, ovvero un alimentatore stabilizzato alimenta il motore DC a magnete permanente, il quale porta in rotazione l'albero del torsiometro meccanico impiegato per la misura di coppia agente sul rotore del generatore bipolare.

La coppia rilevata dal torsiometro meccanico viene convertita in un segnale elettrico ad essa proporzionale ed inviato al canale dell'oscilloscopio digitale per poter essere visualizzata.

Oltre al segnale di tensione generato dal torsiometro, l'oscilloscopio digitale rileva anche la tensione in uscita dal generatore i cui avvolgimenti di statore sono elettricamente indipendenti.

Misurazione di coppia alla velocità minima

Nella sottostante figura si riporta la tensione generata a vuoto dal generatore a due poli a magnete permanente posto in rotazione ad una velocità minima pari a 10.74 [rad/s] (misurata mediante tachimetro elettronico).

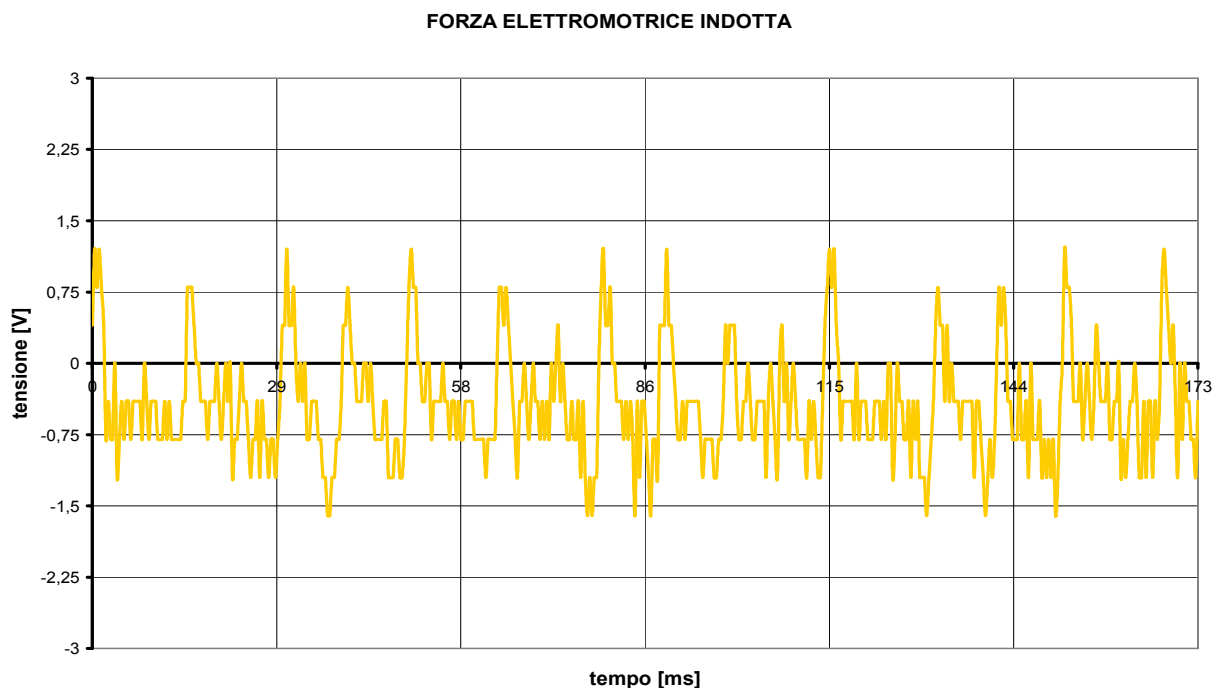


Fig. 7.41: Forza elettromotrice generata a vuoto per $\omega_m = 10.74 \text{ [rad/s]}$

Il valore massimo della forza elettromotrice generata a vuoto ricavato dal grafico di Fig.7.41 in corrispondenza alla minima velocità di rotazione raggiungibile è risultato pari a:

$$\hat{V}_0 = 1.35 \text{ [V]}$$

Mentre il valore picco-picco della tensione generata è risultata pari al seguente valore:

$$\Delta V_0 = 2.88 \text{ [V]}$$

Come si può notare dal grafico sopra riportato la forma d'onda della forza elettromotrice generata si distorce notevolmente per basse velocità di rotazione !

Nella sottostante figura viene riportato l'andamento grafico della coppia agente sul rotore del generatore bipolare a magnete permanente misurata mediante torsiometro meccanico:

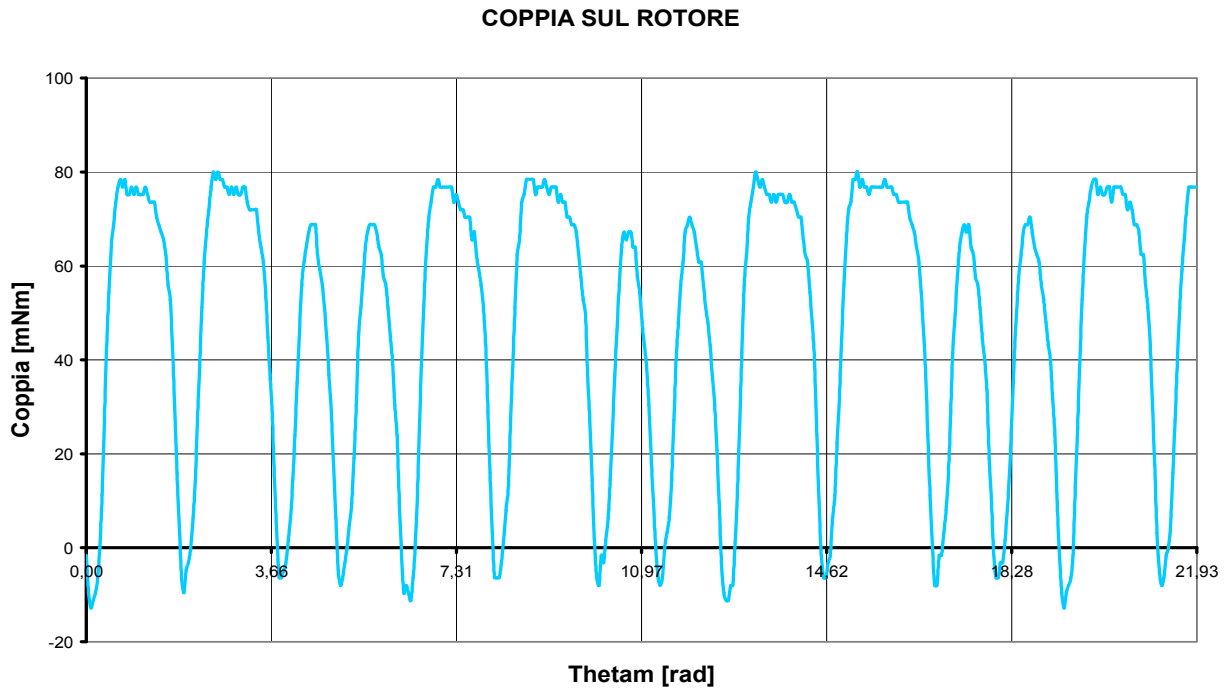


Fig. 7.42: Coppia a vuoto misurata con torsiometro meccanico per $\omega_m = 10.74$ [rad/s]

La forma d'onda della coppia ottenuta va detratta della coppia di offset, ovvero la coppia agente sull'albero del torsiometro meccanico in assenza del generatore; perciò si è proceduto alla misurazione della coppia presente all'albero del rotore senza carico meccanico alla minima velocità di rotazione.

L'andamento grafico della coppia di offset rilevata mediante oscilloscopio digitale viene riportata nella sottostante figura:

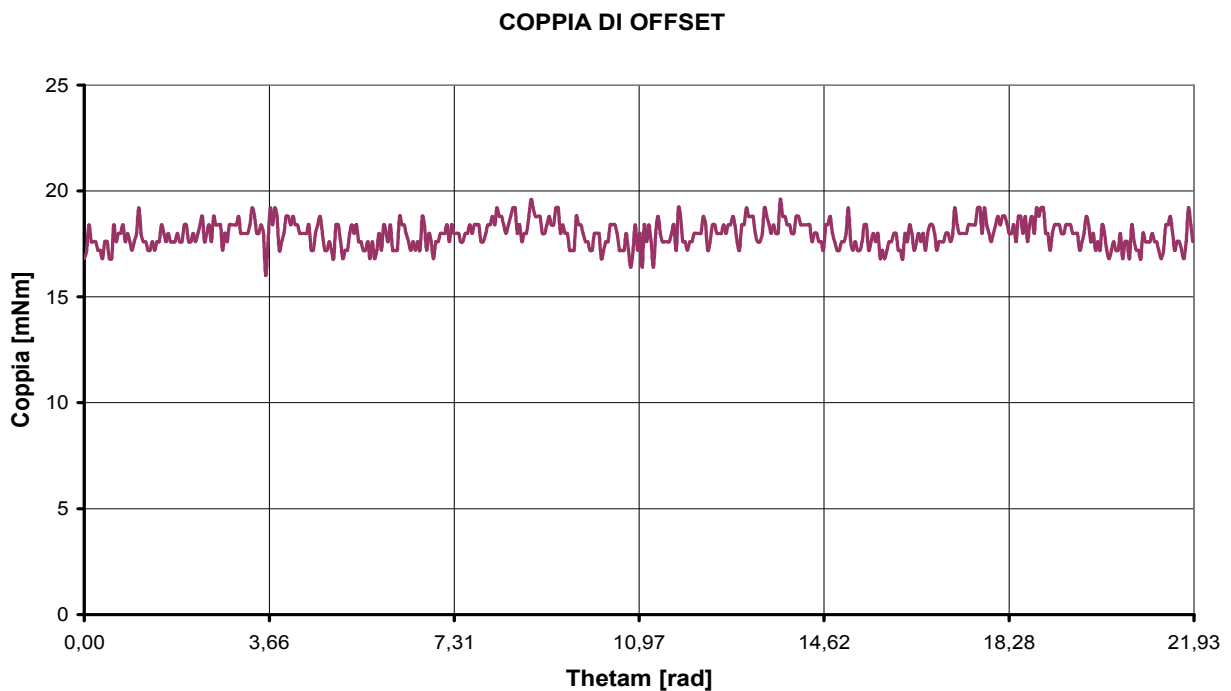


Fig. 7.43: Coppia di offset a vuoto misurata con torsiometro meccanico per $\omega_m = 10.74$ [rad/s]

La coppia al netto dell' offset agente sul rotore del generatore a magnete permanente funzionante a vuoto viene riportata nella seguente figura, come si può notare il massimo impuntamento si ha quando i poli di rotore si trovano in corrispondenza dei magneti permanenti di statore:

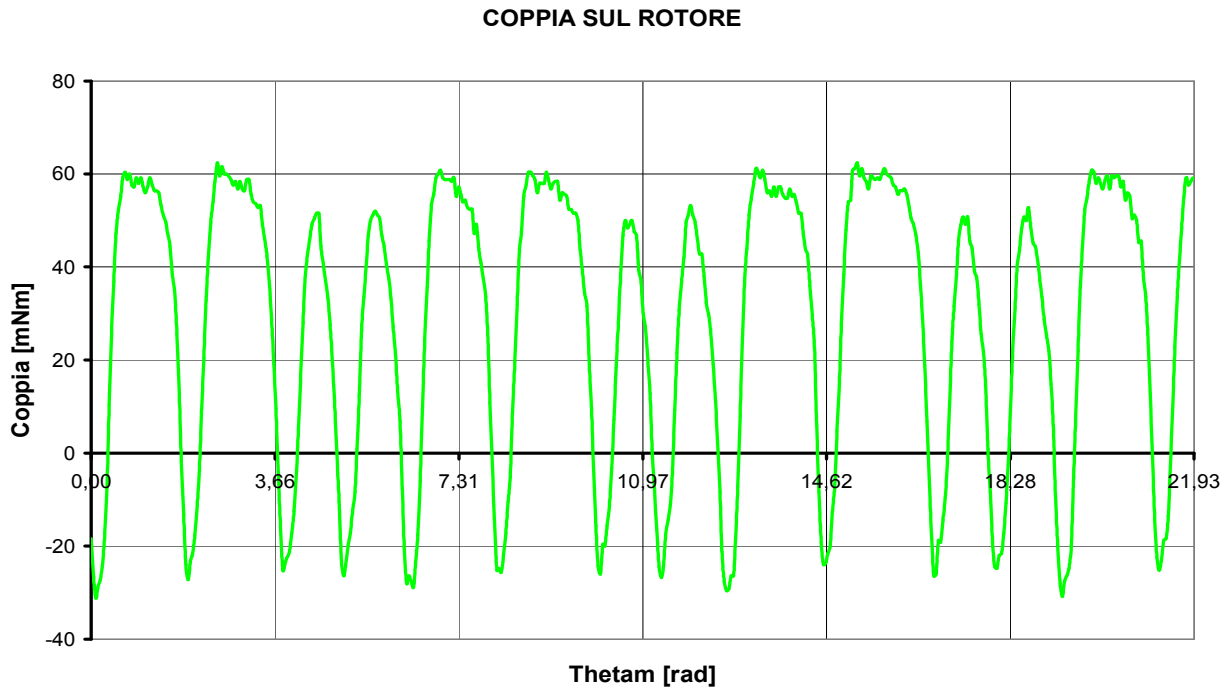


Fig. 7.44: Coppia netta a vuoto misurata con torsionmetro meccanico per $\omega_m = 10.74$ [rad/s]

Il valore medio della coppia misurata è dunque risultato pari a $T_m = 15.1$ [mNm], mentre il massimo valore di oscillazione di coppia è risultato $\Delta T = 90.5$ [mNm].

Per confronto si riporta qui di seguito l' andamento grafico della coppia a vuoto ottenuta mediante simulazione con software FEMM, ricordando che i risultati da esso forniti sono indipendenti dalla velocità angolare del rotore.

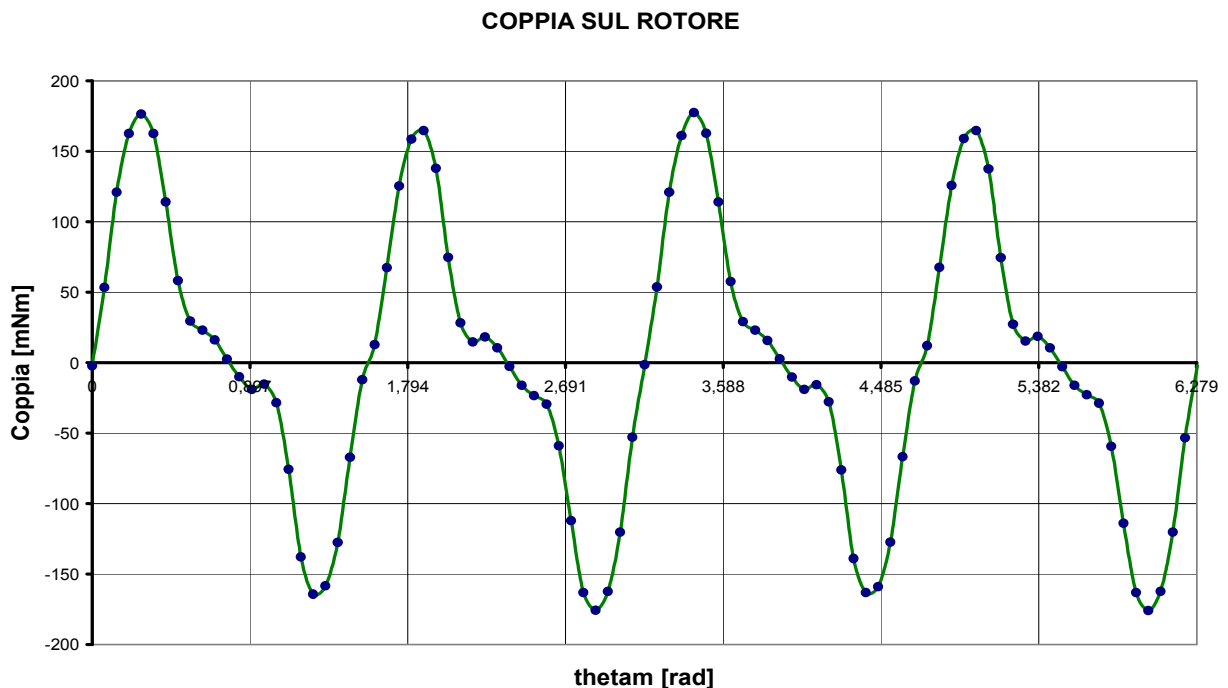


Fig. 7.45: Coppia a vuoto ottenuta mediante programma di simulazione FEMM

Dalla precedente simulazione è stato ottenuto un valore medio di coppia a vuoto pari a $T_m = 79.1$ [mNm] ed una massima oscillazione di coppia pari a $\Delta T = 351$ [mNm].

I valori di T_m e ΔT ottenuti dalla simulazione risultano circa il triplo dei corrispondenti valori misurati, tuttavia questa differenza non è esagerata se si considera che il torsiometro meccanico utilizzato presenta una coppia nominale pari ad 1 [Nm].

Misurazione di coppia alla velocità massima

Nella sottostante figura viene riportato il grafico della tensione in funzione del tempo visualizzata mediante oscilloscopio digitale alla massima velocità angolare raggiungibile pari a 170 [rad/s]:

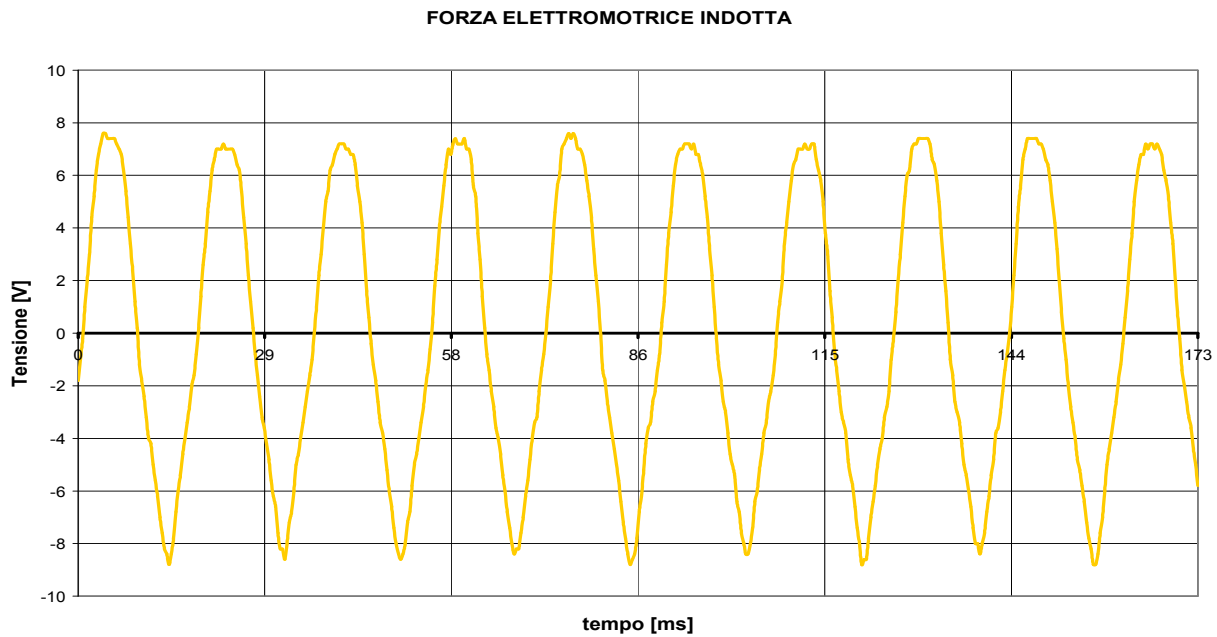


Fig. 7.46: Forza elettromotrice generata a vuoto per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Si riporta inoltre l'andamento grafico della coppia agente sul rotore del generatore bipolare misurata mediante torsiometro meccanico alla massima velocità di rotazione:

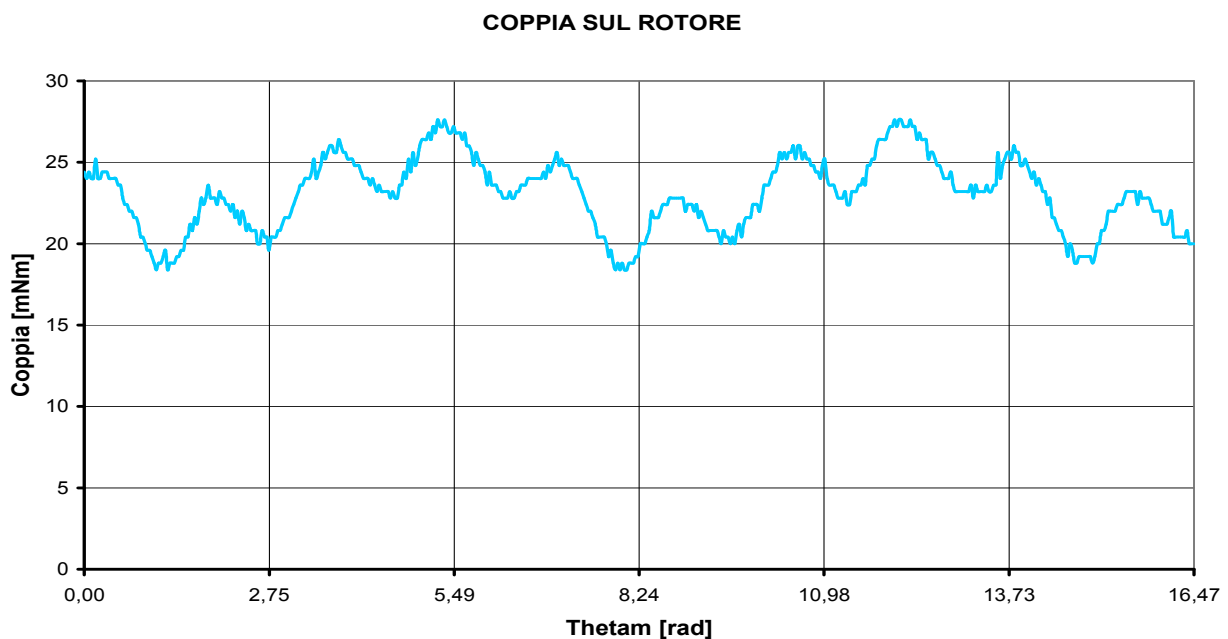


Fig. 7.47: Coppia a vuoto misurata con torsiometro meccanico per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Nella seguente figura viene riportata la coppia di offset presente all' albero del torsionometro meccanico in assenza del generatore, misurata mediante oscilloscopio digitale alla massima velocità di rotazione.

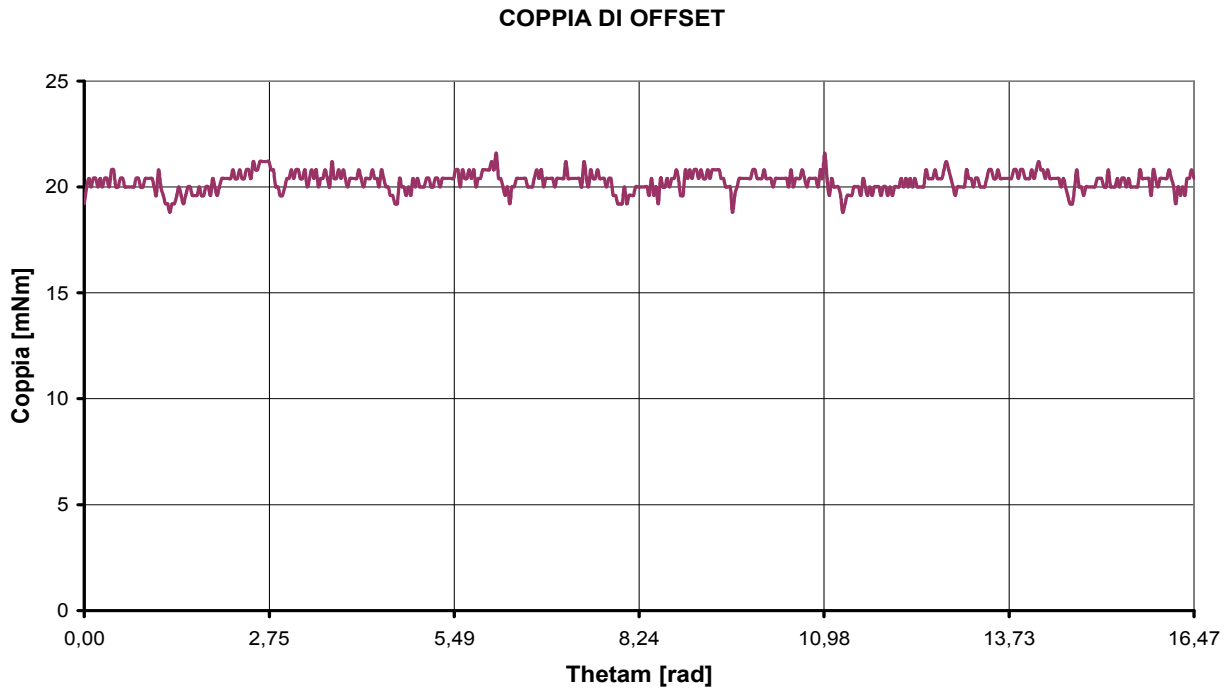


Fig. 7.48: Coppia di offset misurata con torsionometro meccanico per $\omega_m = 170$ [rad/s]

La coppia netta agente sul rotore si determina quindi detraendo dalla coppia misurata mediante torsionometro meccanico la coppia di offset misurata alla massima velocità di rotazione; nella figura seguente ne viene riportato l' andamento grafico in funzione del tempo ottenuto mediante foglio elettronico EXCEL:

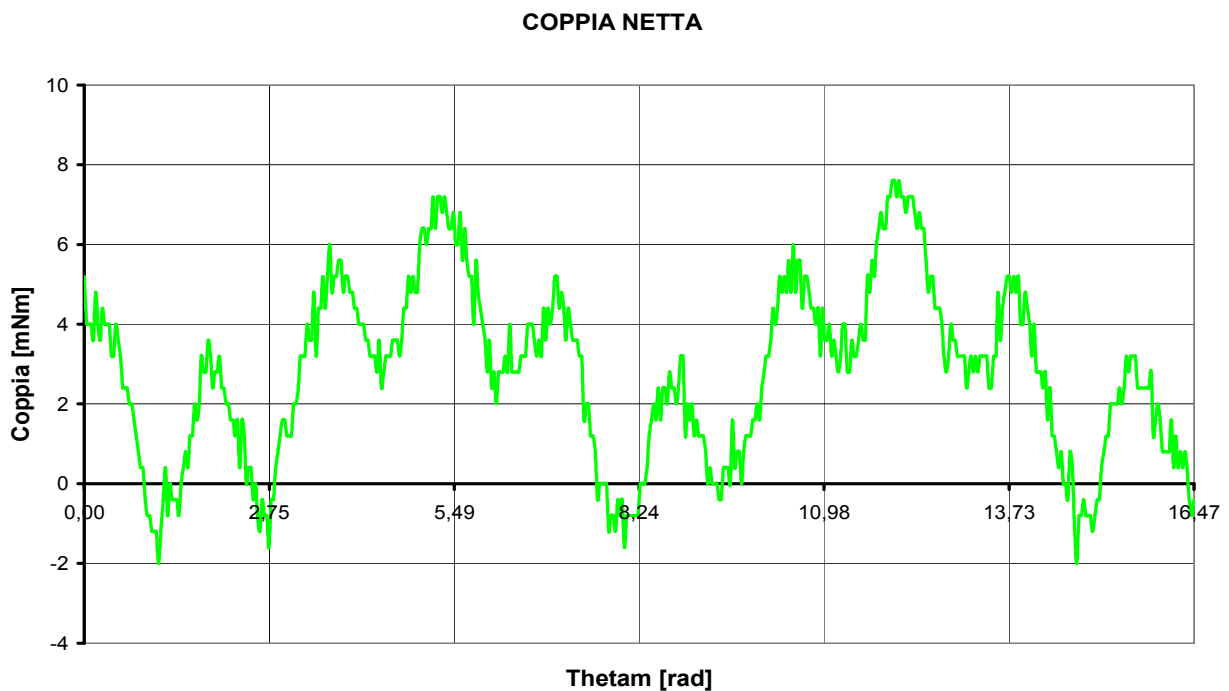


Fig. 7.49: Coppia netta a vuoto misurata con torsionometro meccanico per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Dalla precedente figura si ricava dunque un valore medio di coppia agente sul rotore pari a $T_m = 2.91$ [mNm], mentre la massima oscillazione di coppia è risultata pari a $\Delta T = 9.75$ [mNm].

A titolo di confronto viene riportato nella seguente figura il grafico della coppia presente sul rotore del generatore bipolare ottenuto mediante simulazione con software FEMM:

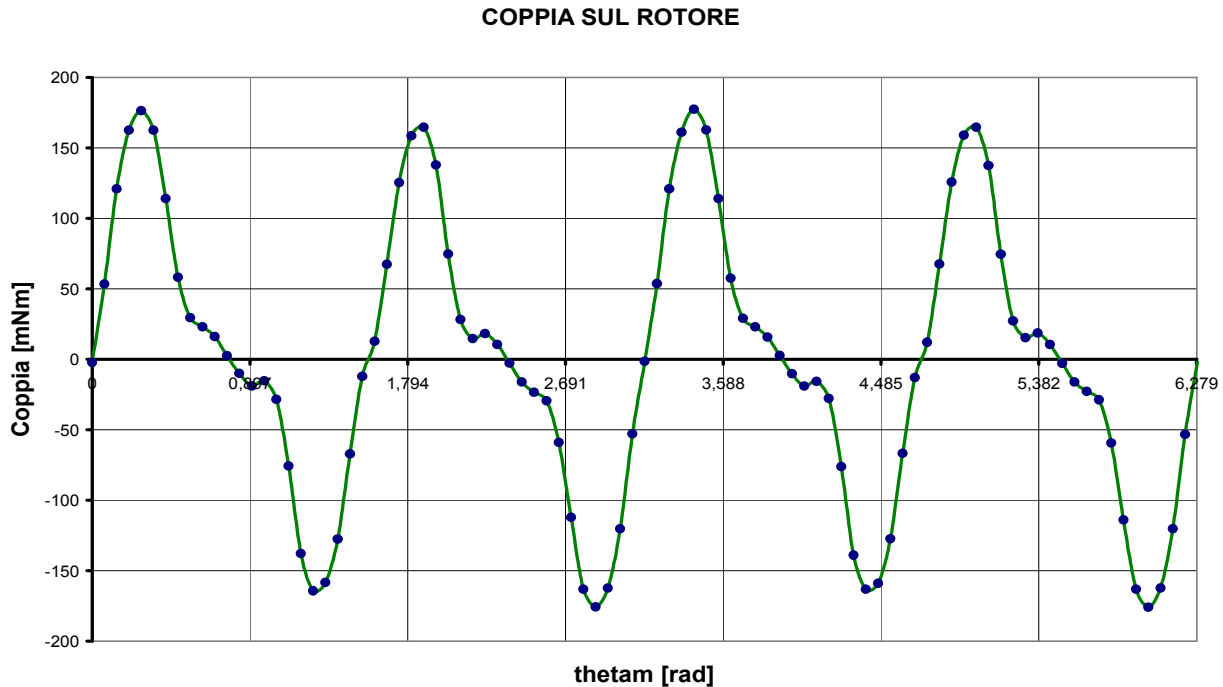


Fig. 7.50: Coppia a vuoto ottenuta mediante programma di simulazione FEMM

Il valore medio raggiunto dalla coppia ottenuta per simulazione mediante software FEMM a vuoto è risultata pari a $T_m = 79.1$ [mNm], mentre la massima oscillazione di coppia è risultata pari a $\Delta T = 352$ [mNm].

Confrontando il grafico di Fig.7.49 con quello di Fig.7.50 si riscontra una certa differenza sia per quanto riguarda la forma d' onda sia per quanto riguarda l' entità dei valori ottenuti.

La differenza tra gli andamenti grafici può essere dovuta alle forze d' inerzia agenti sul blocco in movimento, forze delle quali non è in grado di tenere conto il programma di simulazione FEMM; mentre la differenza riscontrata tra i valori di T_m e ΔT misurati con quelli ottenuti da simulazione può essere giustificata dall' elevato errore relativo di cui sono affette le misurazioni di coppia effettuate mediante torsionmetro meccanico.

7.7.2 MISURA DI COPPIA A CARICO IN REGIME SINUSOIDALE

Misurata la coppia a vuoto presente sul rotore del generatore a magneti permanenti costruito si è proceduto alla misurazione della coppia ad esso applicata a carico in regime sinusoidale, in particolare quando il generatore alimenta un resistore di resistenza pari a $5\ [\Omega]$ con gli avvolgimenti di statore connessi in serie al fine di ottenere la massima tensione possibile.

Misurazione di coppia alla velocità minima

Nella seguente figura si riporta l'andamento grafico della tensione ai capi del carico resistivo alimentato dal generatore bipolare alla minima velocità di rotazione raggiungibile, visualizzata mediante oscilloscopio digitale:

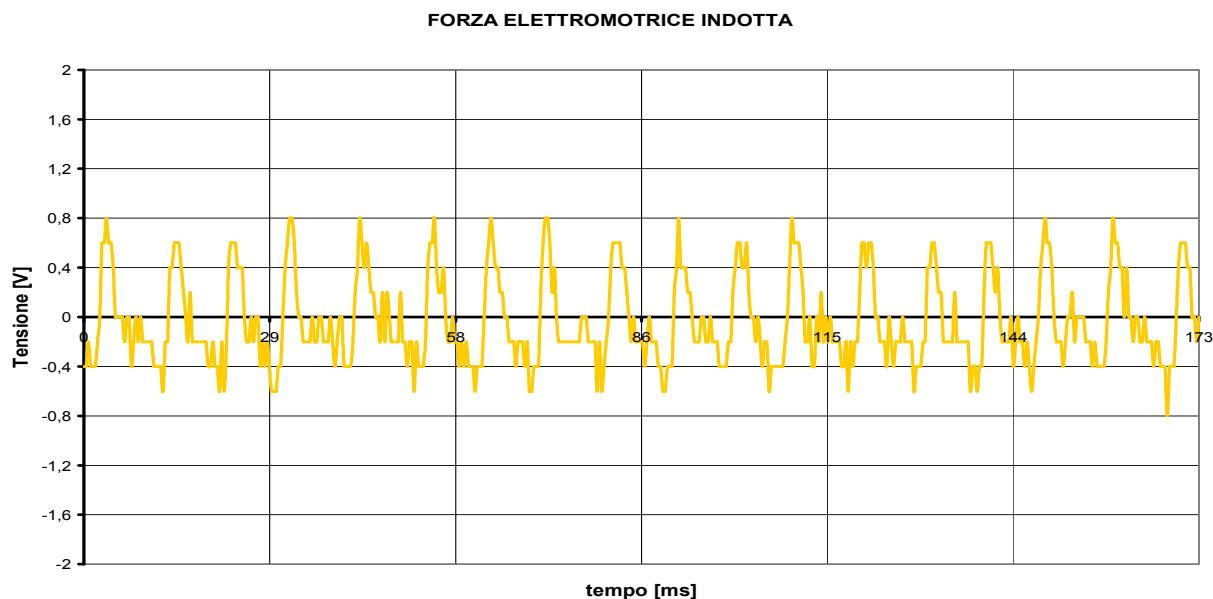


Fig. 7.51: Tensione applicata al carico in regime sinusoidale per $\omega_m = 30\ [\text{rad/s}]$

Mentre i valori della coppia agente sul rotore misurata con torsionometro meccanico e successivamente rilevata sottoforma di tensione dall'oscilloscopio digitale vengono qui di seguito riportati:

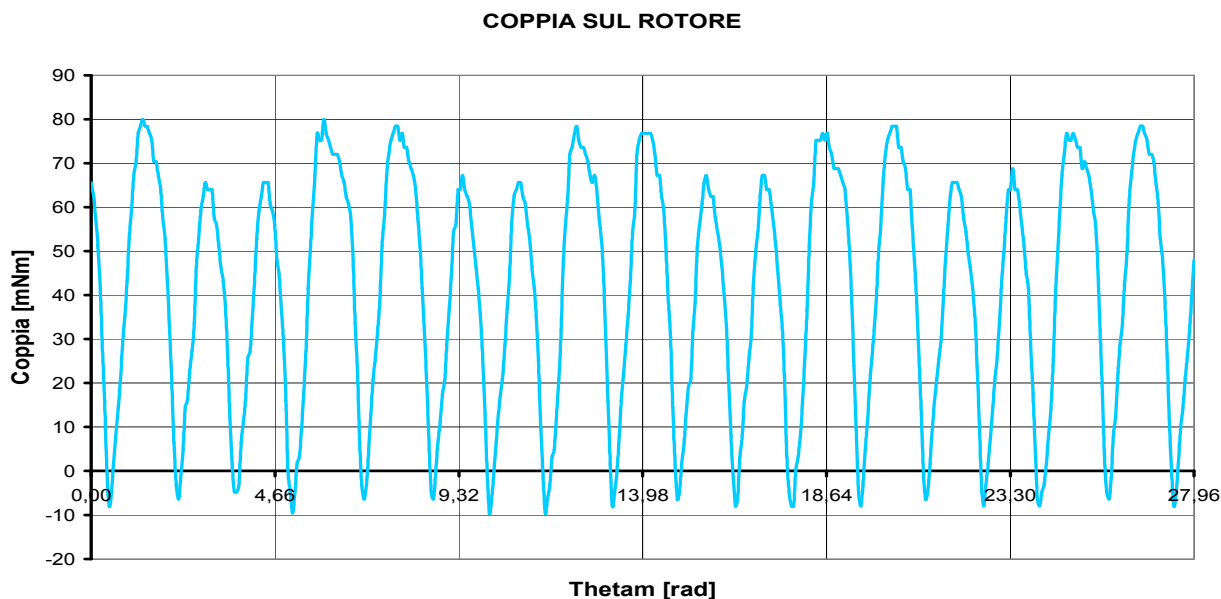


Fig. 7.52: Coppia misurata con torsionometro in regime sinusoidale per $\omega_m = 30\ [\text{rad/s}]$

Per ottenere i valori di coppia effettivamente presente sul rotore del generatore bipolare è necessario detrarre dai valori di coppia misurati i corrispondenti valori di offset ottenuti alla minima velocità di rotazione; nella sottostante figura viene riportato il grafico della coppia netta agente sul rotore:

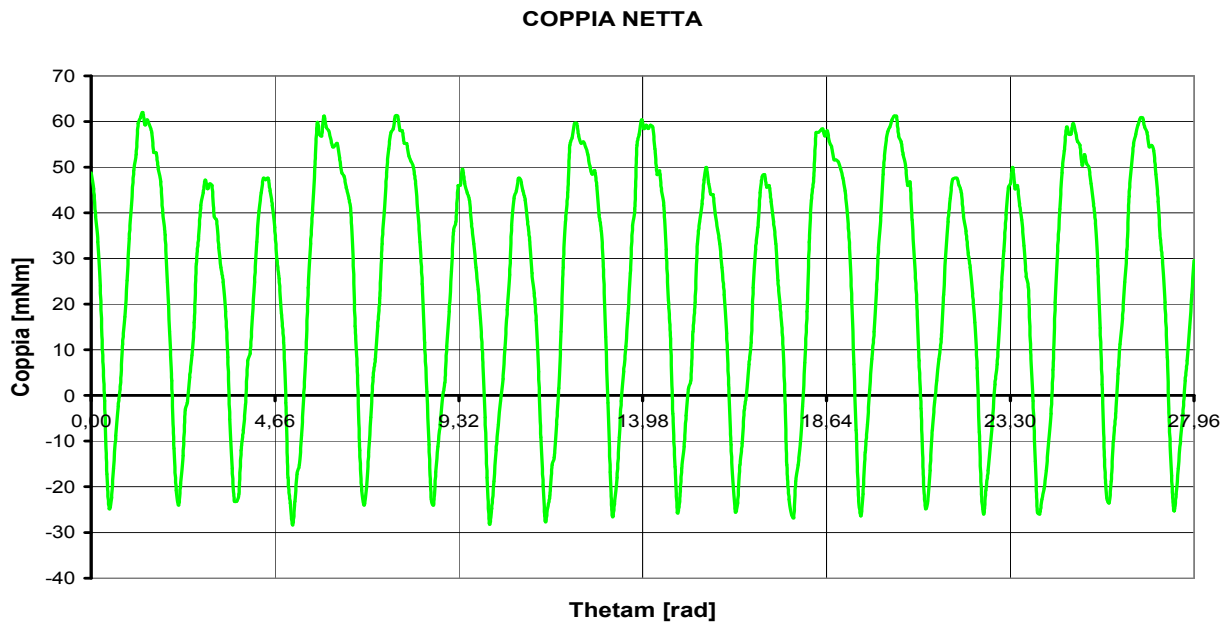


Fig. 7.53: Coppia misurata con torsiometro in regime sinusoidale per $\omega_m = 30$ [rad/s]

Il valore medio di coppia ottenuto è risultato pari a $T_m = 15.2$ [mNm], mentre il corrispondente valore massimo di oscillazione di coppia è risultato pari a $\Delta T = 91$ [mNm]. Per confronto si riportano i valori di coppia ottenuti mediante software di simulazione FEMM nelle stesse condizioni di carico:

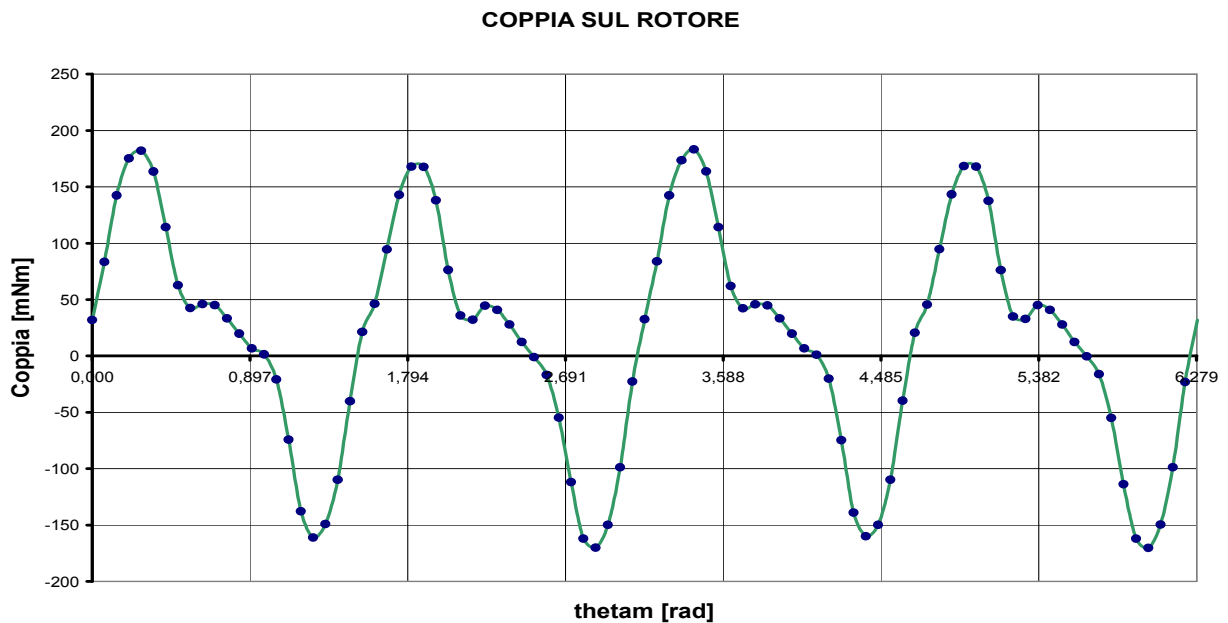


Fig. 7.54: Coppia in regime sinusoidale ottenuta con software di simulazione FEMM

Dal grafico di Fig.7.54 sono stati determinati il valore medio della coppia agente sul rotore e il valore della massima oscillazione, i quali sono risultati rispettivamente pari a $T_m = 5.1$ [mNm] e $\Delta T = 356$ [mNm].

Misurazione di coppia alla velocità massima

Una volta eseguite le misurazioni di coppia alla velocità minima si è proceduta ad alimentare il motore DC a magnete permanente con la massima tensione ottenibile dall'alimentatore stabilizzato, in modo tale da innalzare al massimo la velocità di rotazione del rotore del generatore. Dopodiché si è proceduto alla misurazione mediante oscilloscopio digitale sia della tensione applicata al carico resistivo, sia della tensione in uscita dal torsionmetro meccanico proporzionale alla coppia misurata; nella sottostante figura si riporta l'andamento grafico della tensione sulla resistenza di carico rielaborato tramite foglio elettronico EXCEL:

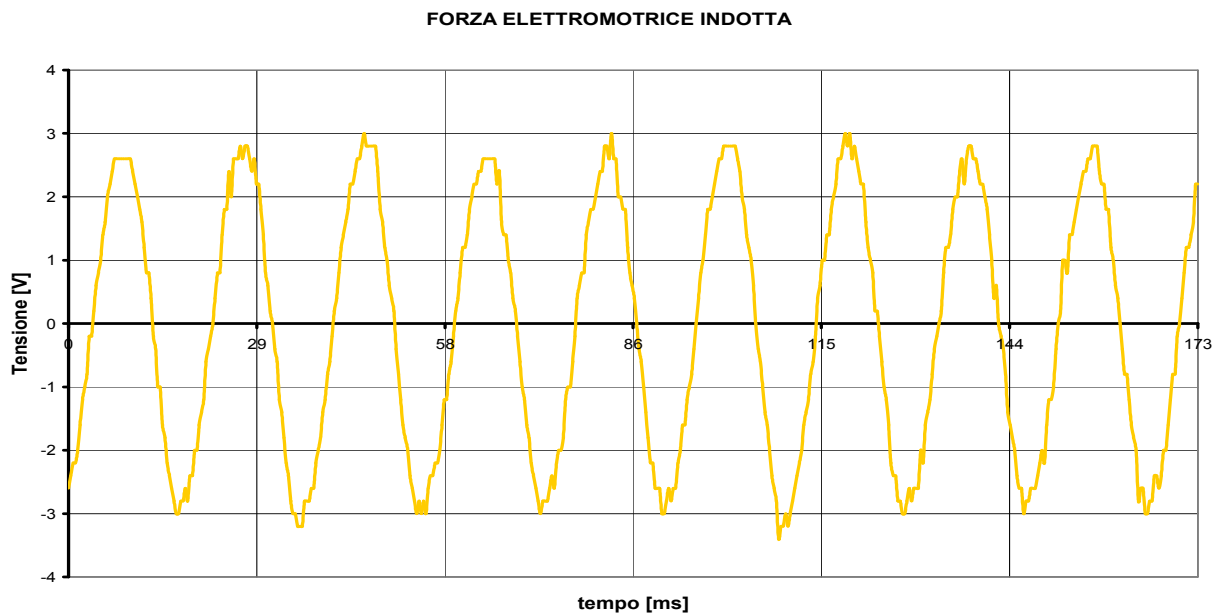


Fig. 7.55: Tensione applicata al carico in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Il valore massimo della tensione applicata alla resistenza di carico è risultata pari a $V_R = 3$ [V], pertanto il valore massimo della corrente sarà pari a $I_R = 0.6$ [A]; detto questo si riporta nella sottostante la coppia agente sul rotore nelle suddette condizioni di carico:

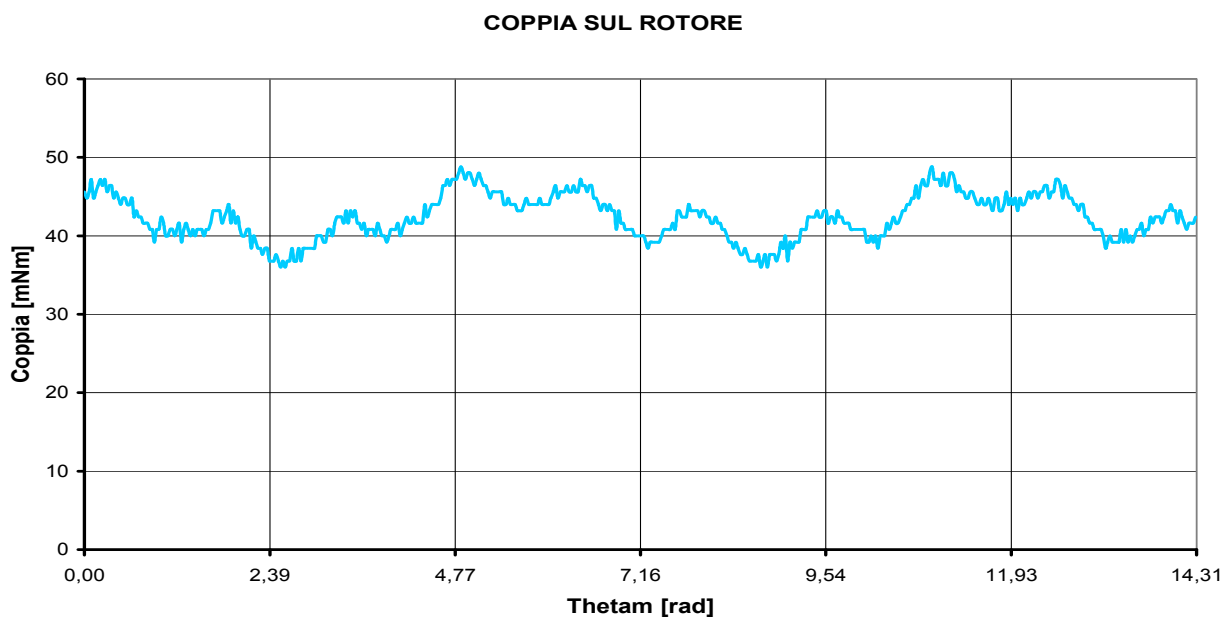


Fig. 7.56: Coppia misurata con torsionmetro in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Si riporta nella sottostante figura l'andamento grafico della coppia agente sul rotore al netto della coppia di offset, precedentemente misurata in assenza di generatore alla massima velocità:

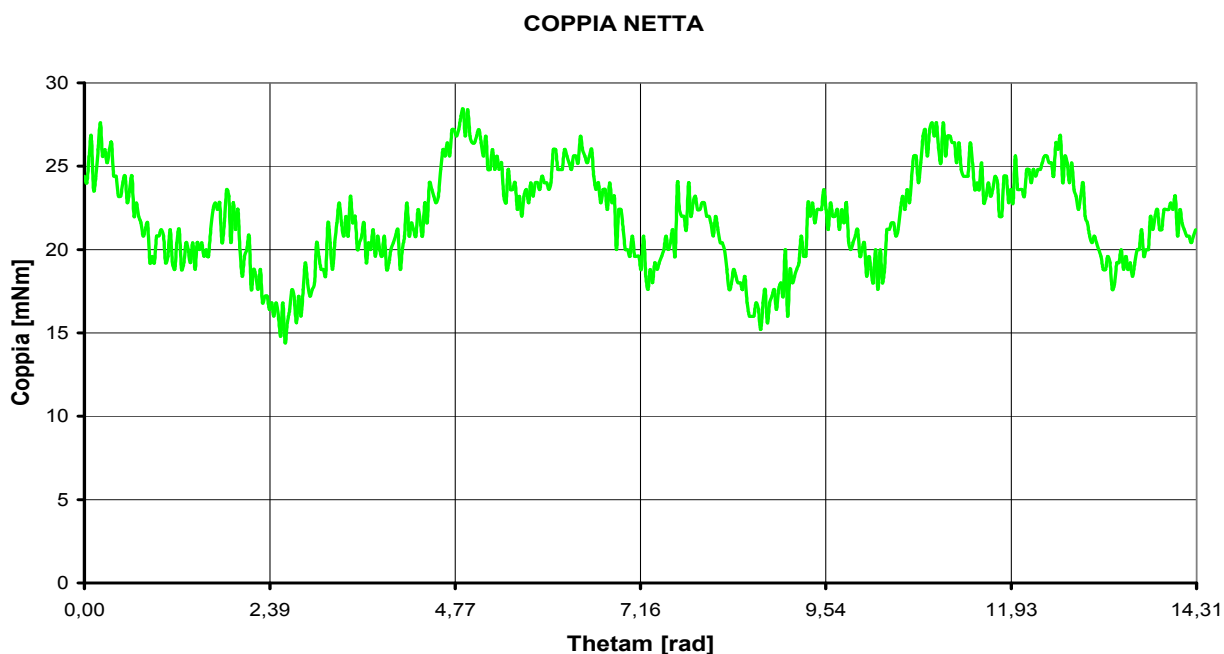


Fig. 7.57: Coppia al netto dell'offset misurata in regime sinusoidale per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Il valore medio della coppia netta applicata sul rotore del generatore bipolare detratta dalla coppia di offset è risultata pari a $T_m = 21.25$ [mNm], mentre la massima oscillazione è risultata pari a $\Delta T = 10.2$ [mNm]; riportiamo nella sottostante figura la coppia agente all'albero del generatore ottenuta mediante simulazione con programma FEMM:

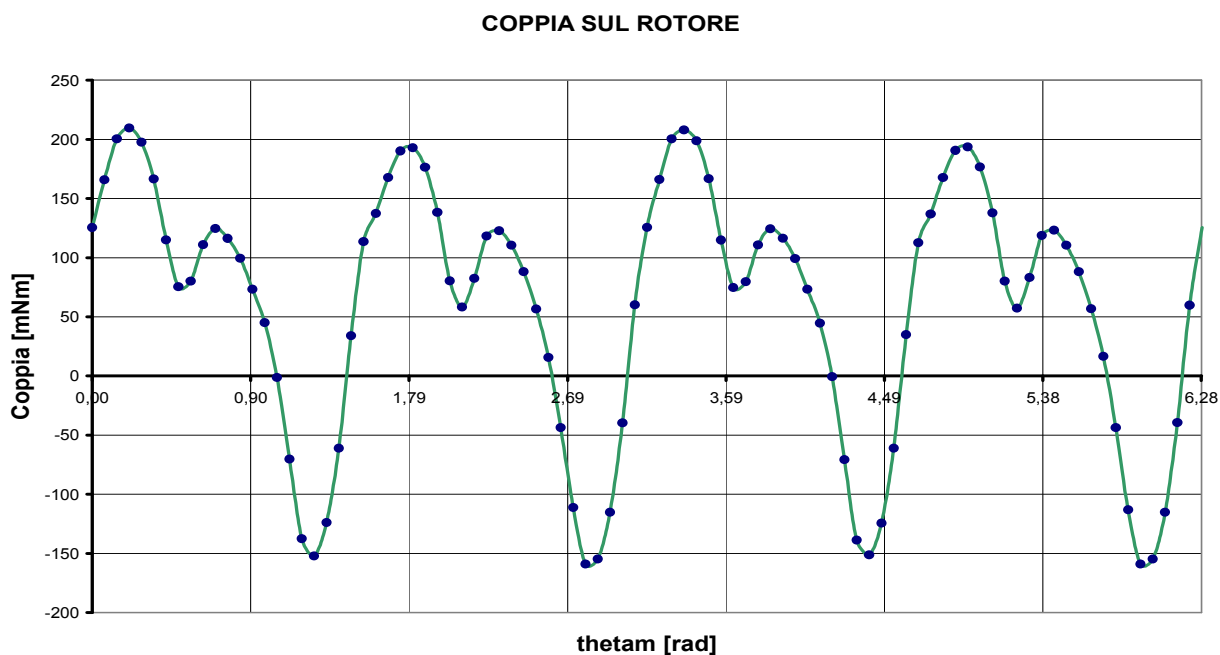


Fig. 7.58: Coppia in regime sinusoidale ottenuta con software di simulazione FEMM

Dal grafico riportato in Fig.7.58 si determina un valore medio della coppia agente sul rotore pari a $T_m = 25.1$ [mNm], mentre il massimo valore di oscillazione di coppia ottenuta mediante programma di simulazione FEMM è risultata pari a $\Delta T = 362$ [mNm].

7.7.3 MISURA DI COPPIA A CARICO IN REGIME CONTINUO

Si è proceduto infine ad eseguire la misurazione della coppia agente sul rotore del generatore bipolare costruito quando questo alimenta un carico puramente resistivo di resistenza pari a $1000\ [\Omega]$ mediante il convertitore monofase a presa centrale progettato e realizzato in precedenza.

Il circuito impiegato per l'esecuzione della prova prevede un alimentatore stabilizzato, con il quale si alimenta il motore DC connesso all'albero del torsionometro meccanico a sua volta connesso mediante giunto al rotore del generatore; quest'ultimo viene infine connesso al carico resistivo mediante il convertitore AC/DC a presa centrale.

Alimentando con tensione gradualmente crescente il motore DC si porta il rotore del generatore alla massima velocità raggiungibile, circa pari a $170\ [\text{rad/s}]$, dopodichè si rileva la tensione rad-drizzata applicata al carico e la tensione in uscita dal torsionometro mediante oscilloscopio digitale. Come promemoria si riporta lo schema elettronico raffigurante il convertitore AC/DC impiegato per la misurazione della coppia all'albero del generatore a due poli, nel quale gli avvolgimenti di statore vengono rappresentati mediante due bobine:

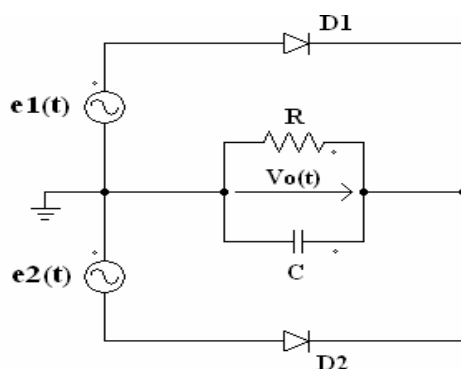


Fig. 7.59: Schema elettronico del convertitore AC/DC

Nella sottostante figura viene riportata la tensione in uscita dal convertitore AC/DC rielaborata mediante foglio elettronico EXCEL:

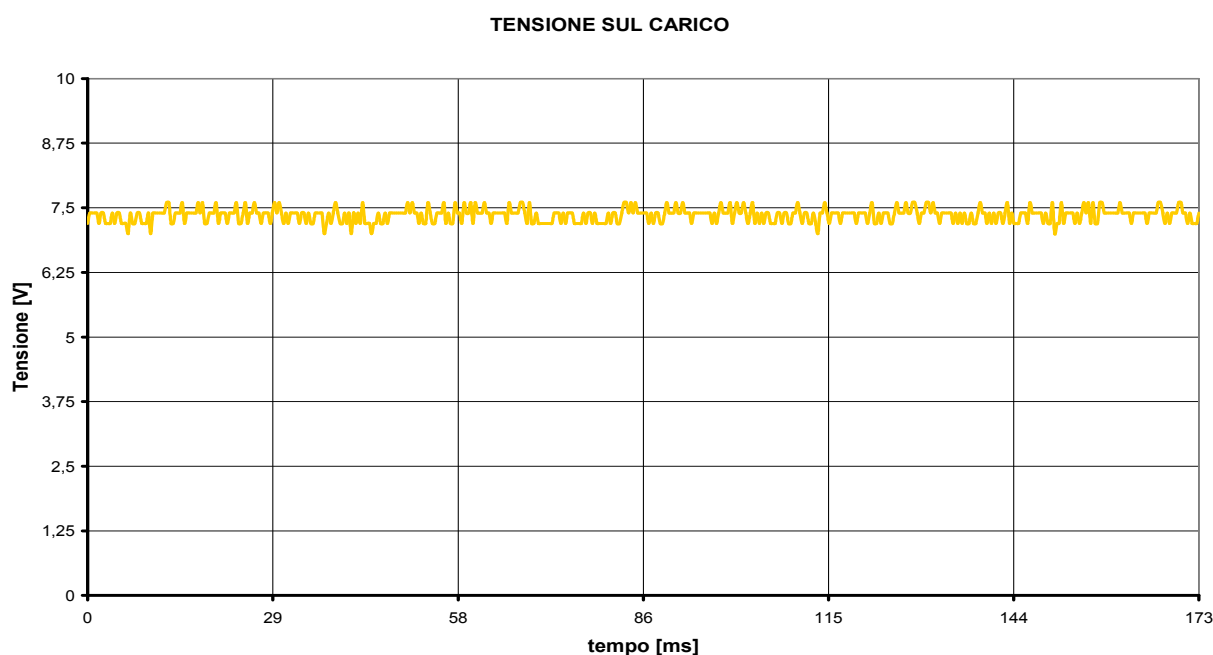


Fig. 7.60: Tensione applicata al carico in regime continuo per $\omega_m = 170\ [\text{rad/s}]$

Nella sottostante figura si riporta il grafico della coppia in funzione del tempo agente sul rotore del generatore quando alimenta una resistenza di $1000\ [\Omega]$ mediante raddrizzatore monofase a presa centrale:

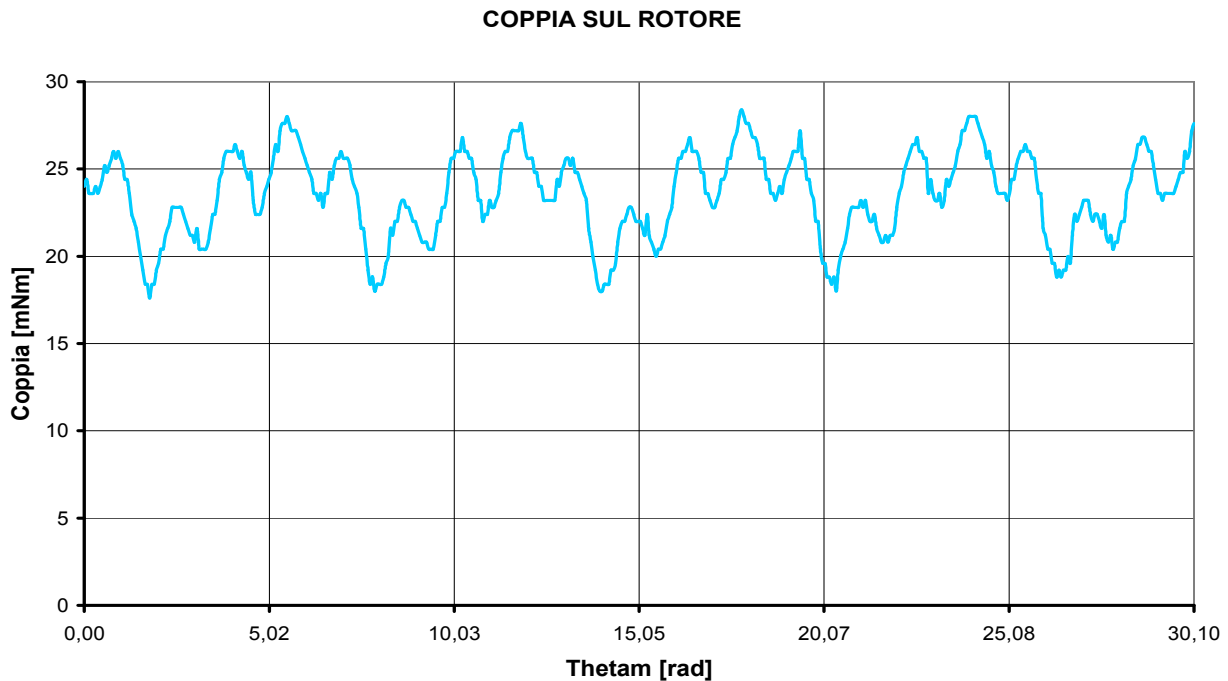


Fig. 7.61: Coppia misurata con torsiometro in regime continuo per $\omega_m = 170\ [\text{rad/s}]$

Come al solito per determinare i valori della coppia effettivamente presenti all' albero del generatore occorre detrarre i corrispondenti valori di coppia di offset misurati alla velocità massima di rotazione raggiungibile:

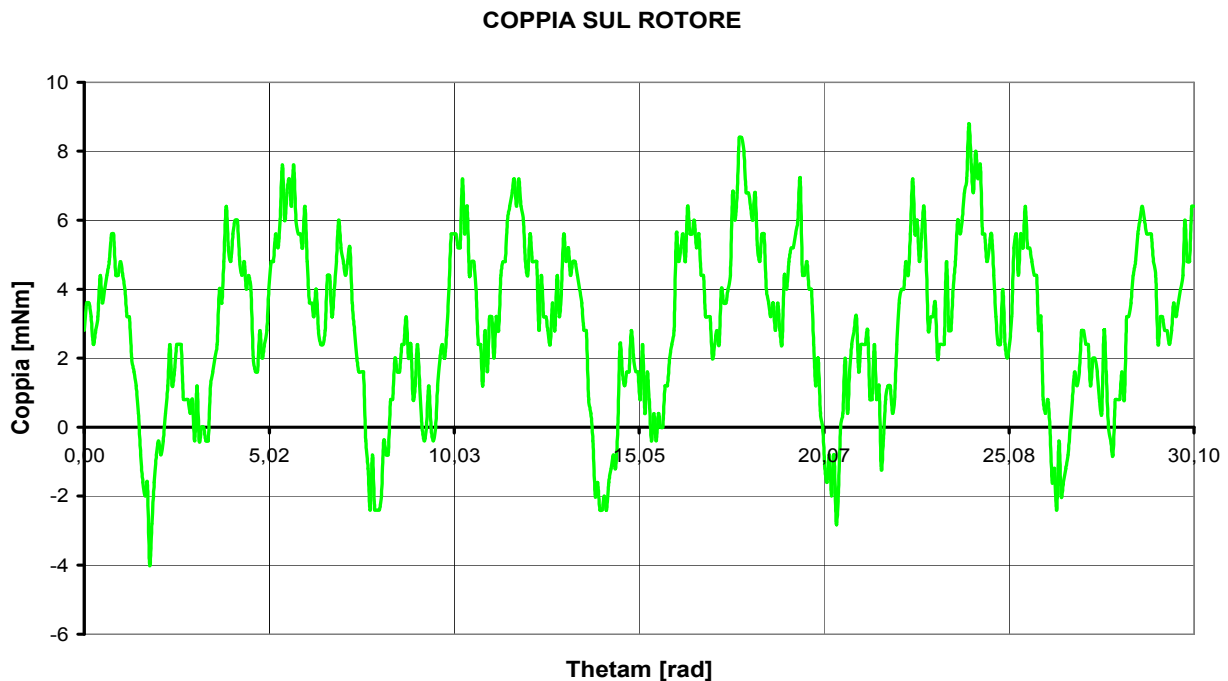


Fig. 7.62: Coppia al netto dell' offset misurata in regime continuo per $\omega_m = 170\ [\text{rad/s}]$

Dalla figura sopra riportata sono stati determinati il valore medio di coppia agente sul rotore, pari a $T_m = 8.85\ [\text{mNm}]$ e la massima oscillazione della coppia risultata pari a $\Delta T = 11.85\ [\text{mNm}]$.

Si riporta infine il grafico della coppia in funzione dell'angolo meccanico θ_m realizzato mediante simulazione con il software FEMM ipotizzando il passaggio di una corrente continua negli avvolgimenti di statore connessi al raddrizzatore di intensità pari a:

$$I_R = \frac{V_R}{R} = \frac{7.2}{1000} = 7.2 \text{ [mA]}$$

Nella quale V_R rappresenta il valore medio della tensione presente sul carico alla massima velocità di rotazione raggiungibile, ossia 170 [rad/s].

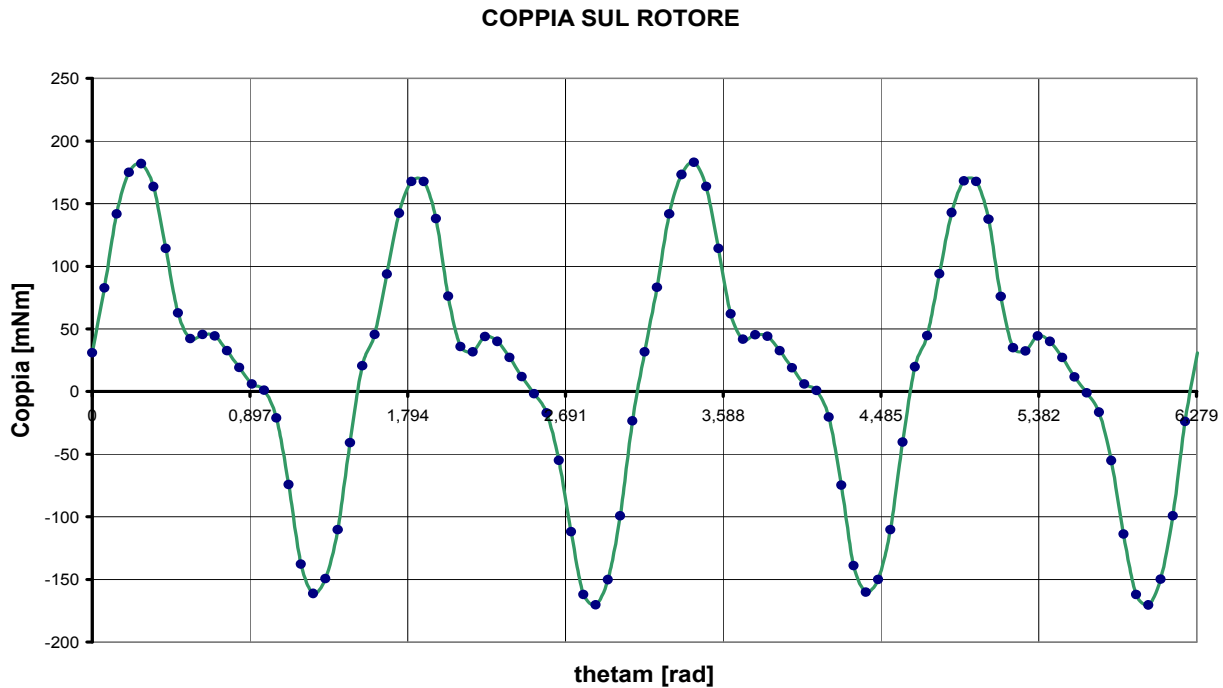


Fig. 7.63: Coppia simulata mediante software FEMM in regime continuo per $\omega_m = 170$ [rad/s]

Dal precedente grafico si ricava un valore medio della coppia ottenuta pari al seguente valore:

$$T_m = 3.10 \text{ [mNm]}$$

Mentre il corrispondente valore massimo di oscillazione di coppia è risultato pari a:

$$\Delta T = 351 \text{ [mNm]}$$

I valori ottenuti dalla simulazione risultano abbastanza maggiori rispetto a quelli misurati mediante torsionometro meccanico, ma questo è probabilmente dovuto alla presenza delle forze d'inerzia e all'elevato errore relativo di cui sono affette le misurazione effettuate.

7.8 VALUTAZIONE DEI RISULTATI OTTENUTI

Dalle misurazioni di tensione a vuoto e nelle diverse condizioni di carico eseguito sul modello di generatore a due poli realizzato è emerso che la forma d'onda della forza elettromotrice generata è caratterizzata da un contenuto armonico più elevato rispetto a quella generata dal generatore a quattro poli.

Inoltre le misurazioni di coppia eseguite mediante torsionometro meccanico forniscono risultati abbastanza differenti da quelli ottenuti mediante simulazioni con software FEMM; in ogni caso i valori di coppia presenti sul rotore nelle diverse condizioni di carico risultano molto più elevati rispetto a quelli del generatore a magneti permanente a quattro poli, il che significa che questo modello di generatore è molto più soggetto ad impuntamento rispetto al suo predecessore.

Queste considerazioni portano dunque alla conclusione che il modello di generatore a magneti permanente a quattro poli è preferibile rispetto al modello bipolare realizzato a fini sperimentali, pur essendo più oneroso da costruire !

CONCLUSIONI

Il lavoro complessivamente svolto ha fornito esiti soddisfacenti poichè i risultati ottenuti mediante programmi di simulazione quali FEMM, Power-Simulation, MATLAB ecc.. sono stati in seguito confermati dai valori forniti dalle misurazioni dirette effettuate sulla macchina realizzata con idonei strumenti di misura, quali oscilloscopio digitale e torsionometro meccanico.

In primo luogo si era in un certo senso scettici sul fatto che un modello di macchina elettrica progettato e analizzato con tanta cura mediante programmi di simulazione e calcoli analitici presentasse una volta costruita esattamente le caratteristiche e le prestazioni previste, questo perchè la realizzazione pratica di un modello astratto comporta inevitabilmente un serie di problematiche e di imprevisti di cui non se ne può tenere conto in fase di progetto.

Invece le misurazioni di coppia e di tensione eseguite sul generatore a magnete permanente costruito, nelle differenti condizioni di carico considerate, hanno confermato la validità e l'attendibilità dei risultati previsti in fase di progetto, e questo è stato motivo di grande soddisfazione !

Durante la fase di costruzione del modello di generatore a magnete permanente progettato sono state riscontrate non poche difficoltà realizzative, in particolare durante la costruzione degli avvolgimenti di statore; questo a causa della mancanza di un idoneo supporto sul quale avvolgere il filo di rame impiegato.

Inoltre si è rivelato più difficile del previsto introdurre gli avvolgimenti costruiti all'interno delle espansioni polari dello statore, a causa dello spazio davvero limitato compreso tra le espansioni stesse nelle quali sono situati i magneti ed i denti di statore.

Nel caso in cui si volesse in futuro realizzare generatori di questo tipo e con queste caratteristiche, si consiglia vivamente di aumentare la lunghezza della corona di statore, in modo tale da agevolare l'introduzione degli avvolgimenti senza correre il rischio di danneggiarli.

In verità lo scopo iniziale del lavoro di tesi era quello di progettare e costruire una vera e propria microturbina, ovvero un convertitore elettromeccanico in grado di generare energia elettrica sfruttando l'energia cinetica e di pressione fornita da un fluido in movimento.

Tuttavia la limitata disponibilità di tempo per una corretta e rigorosa progettazione della paletatura, la mancanza dell'attrezzatura e dei materiali necessari alla sua costruzione e la mancanza di un fluido in movimento con le caratteristiche di velocità e pressione desiderate ci hanno costretto ad abbandonare il progetto della componente rotativa al contatto col fluido, concentrando la nostra attenzione sul generatore a magnete permanente.

In futuro, chiunque volesse contribuire allo sviluppo ed al miglioramento di questo tipo di generatore elettromeccanico potrà dedicarsi al progetto ed alla costruzione della componente rotante a contatto con il fluido, completando in questo modo il lavoro iniziato.

Il motivo per cui ho voluto dedicare il lavoro di tesi all'analisi ed alla costruzione di questa nuova generazione di generatori è data dal fatto che essi costituiscono un vero e proprio mix di semplicità, affidabilità, economicità, ma soprattutto innovazione; per farla breve, presentano tutte le caratteristiche per poter diventare a tutti gli effetti la batteria del futuro e forse, crisi permettendo, in un futuro non troppo lontano !

RINGRAZIAMENTI

Ho ritenuto doveroso riservare quest' ultima sezione per dedicare dei calorosi ringraziamenti a tutte le persone che dedicandomi le loro attenzioni, le loro conoscenze ed i loro consigli mi hanno permesso di realizzare questa laboriosa ma certamente affascinante tesi di laurea:

- **Un caloroso ringraziamento a:**

Nicola Bianchi, docente di Progettazione di Macchine elettriche alla facoltà di ingegneria elettrica di Padova e mio relatore universitario; grazie alla sua disponibilità e ai suoi insegnamenti ho potuto realizzare questo lavoro di tesi !

- **Un caloroso ringraziamento a:**

Mosè Castiello, collaboratore tecnico del laboratorio di Azionamenti Elettrici, che mi ha fornito utili spiegazioni sulla strumentazione disponibile in laboratorio e mi ha dato un aiuto non indifferente sulla costruzione del generatore progettato, dedicandomi tempo e attenzioni !

- **Un caloroso ringraziamento a:**

Tutti i miei colleghi laureandi e ricercatori con i quali ho collaborato durante la mia permanenza al laboratorio di Azionamenti Elettrici, e che mi hanno fornito utili consigli e suggerimenti preziosi !

- **Un caloroso ringraziamento a:**

Tutta la mia famiglia, che mi è stata vicino in questi lunghi e faticosi anni di studio !

- **Un caloroso ringraziamento a:**

La mia fidanzata Silvia Lodola, per le sue attenzioni, i suoi incoraggiamenti, la sua pazienza e soprattutto il suo amore !

Bibliografia

- [1] M.Guarnieri, A.Stella
“Principi e applicazioni di elettrotecnica”
Edizione Progetto Padova
Volume primo - terza edizione
Stampato a Borgoricco (PD) - Ottobre 2002
(pp.163-184)

- [2] Nicola Bianchi
“Calcolo delle macchine elettriche col metodo degli elementi finiti”
Edizione Cleup Padova
Volume primo
Stampato a Verona - 18 Gennaio 2001
(pp.25-36 ; 63-69)

- [3] E.Ambrosini
“Fondamenti di elettronica analogica e di potenza”
Edizione Tramontana
Volume primo
Stampato a Milano - Agosto 2000
(pp.84-92)

- [4] “Microturbina - Start Cup 2012 | Ricerca - Il Sole 24 ORE”
<http://www.startcup.cnr.it/materiale/abstract/Microturbina.pdf>
Data consultazione: 10 Giugno 2013

- [5] “La microturbina: piccola grande sfida green | Idee Green”
<http://www.ideegreen.it/microturbina-13521.html>
Data consultazione: 10 Giugno 2013

Sono stati inoltre reperiti a titolo informativo diversi articoli riguardanti generatori e motori elettrici a magnete permanente scaricati dal sito di ricerca www.ieeexplore.iee.org accessibile dal laboratorio di Azionamenti Elettrici presso la facoltà di Ingegneria Elettrica. La ricerca è stata condotta introducendo la parola chiave **Switching Flux** nella casella di testo denominata *Document Title*. Nelle pagine seguenti vengono riportati i titoli e le informazioni inerenti agli articoli più significativi consultati durante la stesura della tesi.

-
- **Experimental comparison of lamination material case of switching flux synchronous machine with hybrid excitation**

Hoang, E. ; Hlioui, S. ; Lecrivain, M. ; Gabsi, M.

Power Electronics and Applications, 2009. EPE '09. 13th European Conference on

Publication Year: 2009 , Page(s): 1 - 7

Cited by: [Papers \(4\)](#)

- **Performance comparison between switching-flux and IPM machine with rare earth and ferrite PMs**

Fasolo, A. ; Alberti, L. ; Bianchi, N.

Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on

Digital Object Identifier: [10.1109/ICEIMach.2012.6349955](#)

Publication Year: 2012 , Page(s): 731 – 737

- **A new structure of a switching flux synchronous polyphased machine with hybrid excitation**

Hoang, E. ; Lecrivain, M. ; Gabsi, M.

Power Electronics and Applications, 2007 European Conference on

Digital Object Identifier: [10.1109/EPE.2007.4417204](#)

Publication Year: 2007 , Page(s): 1 - 8

Cited by: [Papers \(111\)](#)

- **Comparative Study and Optimal Design of PM Switching Flux Motors**

Fei, W.Z. ; Shen, J.X.

Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International
Volume: 2

Digital Object Identifier: [10.1109/UPEC.2006.367568](#)

Publication Year: 2006 , Page(s): 695 - 699

Cited by: [Papers \(4\)](#)

- **Novel Permanent Magnet Switching Flux Motors**

Fei, W.Z. ; Shen, J.X.

Universities Power Engineering Conference, 2006. UPEC '06. Proceedings of the 41st International
Volume: 2

Digital Object Identifier: [10.1109/UPEC.2006.367575](#)

Publication Year: 2006 , Page(s): 729 - 733

Cited by: [Papers \(11\)](#)

- **Analysis of the Oversaturated Effect in Hybrid Excited Flux-Switching Machines**

Gan Zhang ; Ming Cheng ; Wei Hua ; Jianning Dong

Magnetics, IEEE Transactions on

Volume: 47 , Issue: 10

Digital Object Identifier: [10.1109/TMAG.2011.2157958](#)

Publication Year: 2011 , Page(s): 2827 - 2830

Cited by: [Papers \(3\)](#)

- **Comparison of Hybrid Excitation Topologies for Flux-Switching Machines**

Yu Wang ; Zhiquan Deng

Magnetics, IEEE Transactions on

Volume: 48 , Issue: 9

Digital Object Identifier: 10.1109/TMAG.2012.2196801

Publication Year: 2012 , Page(s): 2518 - 2527

Cited by: Papers (2)

- **Progress of single flux quantum packet switch technology**

Yorozu, S. ; Kameda, Y. ; Hashimoto, Y. ; Terai, H. ; Fujimaki, A. ; Yoshikawa, N.

Applied Superconductivity, IEEE Transactions on

Volume: 15 , Issue: 2 , Part: 1

Digital Object Identifier: 10.1109/TASC.2005.849862

Publication Year: 2005 , Page(s): 411 - 414

Cited by: Papers (5)

- **Magnetic field analysis of a novel flux switching transverse flux permanent magnet wind generator with 3-D FEM**

Jianhu Yan ; Heyun Lin ; Yunkai Huang ; Hengchuan Liu ; Zhu, Z.Q.

Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on

Digital Object Identifier: 10.1109/PEDS.2009.5385837

Publication Year: 2009 , Page(s): 332 - 335

- **Flux-regulation capability of hybrid-excited flux-switching machines**

Wei Hua ; Gan Zhang ; Xiaomei Yin ; Ming Cheng

Electrical Machines (ICEM), 2012 XXth International Conference on

Digital Object Identifier: 10.1109/ICEIMach.2012.6350300

Publication Year: 2012 , Page(s): 2909 - 2913

- **Investigation of iron loss in flux-switching PM machines**

Pang, Y. ; Zhu, Z.Q. ; Howe, D. ; Iwasaki, S. ; Deodhar, R. ; Pride, A.

Power Electronics, Machines and Drives, 2008. PEMD 2008. 4th IET Conference on

Publication Year: 2008 , Page(s): 460 - 464

- **Performance comparison of 24S-10P and 24S-14P field excitation flux switching machine with single DC-Coil polarity**

Sulaiman, E. ; Teridi, M.F.M. ; Husin, Z.A. ; Ahmad, M.Z. ; Kosaka, T.

Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO), 2013 IEEE 7th International

Digital Object Identifier: 10.1109/PEOCO.2013.6564513

Publication Year: 2013 , Page(s): 46 - 51

- **Operation principle and topology structures of axial flux-switching hybrid excitation synchronous machine**

Xiping Liu ; Chen Wang ; Aihua Zheng

Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on

Digital Object Identifier: 10.1109/ICEMS.2011.6073740

Publication Year: 2011 , Page(s): 1 - 7

- **A New Method for Reduction of Detent Force in Permanent Magnet Flux-Switching Linear Motors**

Can-Fei Wang ; Jian-Xin Shen ; Yu Wang ; Li-Li Wang ; Meng-Jia Jin
Magnetics, IEEE Transactions on

Volume: 45 , Issue: 6

Digital Object Identifier: 10.1109/TMAG.2009.2018689

Publication Year: 2009 , Page(s): 2843 - 2846

Cited by: Papers (26)

- **An Integration Algorithm for Stator Flux Estimation of a Direct-Torque-Controlled Electrical Excitation Flux-Switching Generator**

Yu Wang ; Zhiquan Deng

Energy Conversion, IEEE Transactions on

Volume: 27 , Issue: 2

Digital Object Identifier: 10.1109/TEC.2012.2188139

Publication Year: 2012 , Page(s): 411 – 420

- **Comparison of flux-switching and doubly-salient permanent magnet brushless machines**

Hua, W. ; Zhu, Z.Q. ; Cheng, M. ; Pang, Y. ; Howe, D.

Electrical Machines and Systems, 2005. ICEMS 2005. Proceedings of the Eighth International Conference on

Volume: 1

Digital Object Identifier: 10.1109/ICEMS.2005.202506

Publication Year: 2005 , Page(s): 165 - 170 Vol. 1

Cited by: Papers (28)

- **Comparison and study of 6/5- and 12/10-pole permanent magnet flux-switching motors considering flux-weakening capability**

Wang, Y. ; Huang, Z.W. ; Shen, J.X. ; Wang, C.F.

Electrical Machines and Systems, 2008. ICEMS 2008. International Conference on

Publication Year: 2008 , Page(s):

- **Flux-Switching Machine With DC Excitation**

Tang, Y. ; Paulides, J.J.H. ; Motoasca, T.E. ; Lomonova, E.A.

Magnetics, IEEE Transactions on

Volume: 48 , Issue: 11

Digital Object Identifier: 10.1109/TMAG.2012.2199100

Publication Year: 2012 , Page(s): 3583 - 3586 3583 - 3586

- **Comparative Study of Flux-Switching and Doubly-Salient PM Machines Particularly on Torque Capability**

Wei Hua ; Ming Cheng ; Hongyun Jia ; Xiaofan Fu

Industry Applications Society Annual Meeting, 2008. IAS '08. IEEE

Digital Object Identifier: 10.1109/08IAS.2008.58

Publication Year: 2008 , Page(s): 1 - 8

- **Permanent-Magnet Flux-Switching Synchronous Motor Employing a Segmental Rotor**

Zulu, A. ; Mecrow, B.C. ; Armstrong, M.
 Industry Applications, IEEE Transactions on
 Volume: 48 , Issue: 6
 Digital Object Identifier: 10.1109/TIA.2012.2226922
 Publication Year: 2012 , Page(s): 2259 – 2267

- **Predictive Direct Torque Control of the Doubly Fed Induction Machine with Reduced Torque and Flux Ripples at Low Constant Switching Frequency**

Abad, G. ; Rodriguez, M.A. ; Poza, J.
 IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on
 Digital Object Identifier: 10.1109/IECON.2006.347349
 Publication Year: 2006 , Page(s): 1000 - 1005
 Cited by: Papers (5)

- **Eddy Current Loss in the Frame of a Flux-Switching Permanent Magnet Machine**

Pang, Y. ; Zhu, Z.Q. ; Howe, D. ; Iwasaki, S. ; Deodhar, R. ; Pride, A.
 Magnetics, IEEE Transactions on
 Volume: 42 , Issue: 10
 Digital Object Identifier: 10.1109/TMAG.2006.879442
 Publication Year: 2006 , Page(s): 3413 - 3415 3413 - 3415
 Cited by: Papers (23)

- **Simulink model of controlled power factor flux switching generator system for embedded power generation**

Ochije, K.N. ; Pollock, C.
 Industry Applications Conference, 2005. Fourtieth IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2005
 Volume: 4
 Digital Object Identifier: 10.1109/IAS.2005.1518835
 Publication Year: 2005 , Page(s): 2657 - 2664 Vol. 4
 Cited by: Papers (2)

- **Comparison of flux-regulation capability of a hybrid-excited flux-switching machine with different magnet materials**

Wei Hua ; Gan Zhang ; Ming Cheng ; Xikai Sun
 Electromagnetic Field Computation (CEFC), 2010 14th Biennial IEEE Conference on
 Digital Object Identifier: 10.1109/CEFC.2010.5480331
 Publication Year: 2010 , Page(s): 1
 Cited by: Papers (3)

- **Electromagnetic Performance Analysis of Hybrid-Excited Flux-Switching Machines by a Nonlinear Magnetic Network Model**

Wei Hua ; Gan Zhang ; Ming Cheng ; Jianning Dong
 Magnetics, IEEE Transactions on
 Volume: 47 , Issue: 10
 Digital Object Identifier: 10.1109/TMAG.2011.2154377
 Publication Year: 2011 , Page(s): 3216 - 3219 3216 - 3219
 Cited by: Papers (2)